

잡음환경 하에서 산란신호 사이의 상관계수를 이용한 매설된 산란체의 특성 분석

정회원 김 동 호*, 조 평 동*

Characteristic Analysis of Buried Scatterers using the Correlation Coefficient of Scattered Signals under the Noisy Environment

Dong-ho Kim*, Pyung-dong Cho* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 지하 탐사용 레이더를 이용한 특정 산란체의 간단한 탐지 방법을 제안하였다. 기본 원리는 매설된 특정 산란체를 기준으로 하여 몇 가지 크기와 모양 및 전기적 특성이 유사한 산란체들로부터 발생하는 산란 신호의 차이를 상관함수(correlation function)를 이용하여 탐지하는 것이다. 산란체가 매설된 지하매질로는 레이더의 동작 주파수에 따른 분산과 손실 등의 전기적 특성 변화를 시뮬레이션에 반영하기 위하여 다항 Debye 모델이 사용되었다. 지상 및 지하 매질에서의 3차원 전파(電波) 전파(傳播) 시뮬레이션을 위해 FDTD 방법을 사용하였다.

ABSTRACT

A simple buried scatterers detection method using ground penetrating radar is investigated. Basic idea is based on the understanding of the difference of scattered signals from various scatterers and employs the disagreement of those signals to detect the specific buried scatterers using correlation function. We use the Debye model for the formulation of underground medium which shows lossy and dispersive characteristics for the variation of operating frequency. In addition, FDTD method is adopted for three dimensional electromagnetic wave propagation simulation.

I. 서 론

지하 탐사용 레이더(Ground penetrating radar)는 지하 매질 내부에 존재하는 전기적 특성의 불연속성을 탐사에 이용한다. 이러한 불연속성은 크게 지질학적 응용사례에서 이용되는 매질과 매질간의 불연속성과 매설 또는 매몰된 특정 산란체 등의 탐지에 응용되는 매질 내부에 존재하는 물체에 의한 불연속성으로 나누어 볼 수 있다^[1]. 본 논문에서는 지하 매질 속에 존재하는 특정 산란체의 탐지 방법에 초점을 맞추었다. 기본 원리는 서로 다른 산란체들에 의해 유기되는 산란 신호 사이의 차이를 상관계수를 이용하여 탐지하는 것으로써 잡음환경 아래에

서 상관계수들 간의 관계를 제시하였다.

실제의 지하 매질과 유사한 분산과 손실 특성을 나타내기 위하여 시뮬레이션상의 지하 매질의 전기적 특성은 레이더 동작 주파수의 함수가 되도록 모델링 되었다. 지하 매질 모델은 다항 Debye (Multiterm Debye model) 모델을 사용하였다^[2].

II. 지하 매질의 전기적 특성

일반적으로 지하 매질은 침투 주파수에 따라 상이한 분산과 손실의 특성을 갖는다. 특히 광대역 펄스를 사용하는 레이더의 경우 매질의 전기적 특성은 반드시 고려되어야 하며, 동작 주파수에 따른 변화를 포함하지 않는 기존의 매질특성 파라미터의

* 한국전자통신연구원 표준연구센터 기술기초연구팀(dhkim@pec.etri.re.kr, pdcho@etri.re.kr)
논문번호 : 00398-1016, 접수일자 : 2000년 10월 16일

사용은 지양(止揚)되어야 한다. 본 논문에서는 이러한 지하 매질의 특성을 정식화하기 위하여 식 (1)과 같은 다항 Debye 모델을 사용하였다.

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \chi(\omega) + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} \quad (1a)$$

$$\chi(\omega) = \sum_{p=1}^N (\epsilon_p - \epsilon_\infty) / (1 + j\omega\tau_p) \quad (1b)$$

여기서 ϵ_n 는 자유공간 유전율, ϵ_r 및 σ 는 지하매질의 상대 유전율과 도전율, ϵ_∞ 및 ϵ_p 는 각각 고주파수 및 저주파수에서의 유전율, τ_p 는 지하매질 고유의 이완시간을 나타낸다. N값을 조정함으로써 지하매질의 전기적 특성 파라미터들을 실제 측정치와 유사하게 맞추어 줄 수 있으며, 여기서는 $N=2$ 인 값을 사용하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터들이다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 다항 Debye 모델 파라미터.

수분 함유량	ϵ_∞	σ (mS/m)	ϵ_1	ϵ_2	τ_1 (ns)	τ_2 (ns)
2.5 %	3.20	0.397	3.95	3.50	2.71	0.108
5 %	4.15	1.11	5.95	4.75	3.79	0.151
10 %	6.00	2.00	8.75	6.75	3.98	0.251

다항 Debye 모델을 FDTD 방법에 적용시킨 결과 식들이 아래에 주어졌으며, 자세한 유도 과정은 생략하였다^{[3], [4]}.

$$E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1} = C_a \left\{ \left[\epsilon_\infty - \sum_{p=1}^N \xi_p^0 - \frac{\sigma\Delta t}{2\epsilon_0} \right] E_x|_{i+1/2,j,k}^n + \sum_{p=1}^N \Psi_{px}|_{i+1/2,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_0\Delta} \left[H_z|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2} + H_y|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} \right] \right\} \quad (2a)$$

$$E_y|_{i,j+1/2,k}^{n+1} = C_a \left\{ \left[\epsilon_\infty - \sum_{p=1}^N \xi_p^0 - \frac{\sigma\Delta t}{2\epsilon_0} \right] E_y|_{i,j+1/2,k}^n + \sum_{p=1}^N \Psi_{py}|_{i,j+1/2,k}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_0\Delta} \left[H_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x|_{i,j+1/2,k-1/2}^{n+1/2} + H_z|_{i-1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} \right] \right\} \quad (2b)$$

$$E_z|_{i,j,k+1/2}^{n+1} = C_a \left\{ \left[\epsilon_\infty - \sum_{p=1}^N \xi_p^0 - \frac{\sigma\Delta t}{2\epsilon_0} \right] E_z|_{i,j,k+1/2}^n + \sum_{p=1}^N \Psi_{pz}|_{i,j,k+1/2}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_0\Delta} \left[H_y|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} + H_x|_{i,j-1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} \right] \right\} \quad (2c)$$

$$\text{단, } C_a = 1 / \left[\epsilon_\infty + \sum_{p=1}^N (\chi_p^0 - \xi_p^0) + \sigma\Delta t / 2\epsilon_0 \right],$$

$$\Psi_p^n = \sum_{m=0}^{n-1} \left\{ E^{n-m} \Delta \chi_p^m + (E^{n-m-1} - E^{n-m}) \Delta \xi_p^m \right\},$$

$$\Delta \chi_p^m = \chi_p^m - \chi_p^{m+1}, \Delta \xi_p^m = \xi_p^m - \xi_p^{m+1},$$

$$\chi_p^m = \int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t} \chi_p(\Lambda) d\Lambda, \xi_p^m = \frac{1}{\Delta t} \int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t} (\Lambda - m\Delta t) \chi_p(\Lambda) d\Lambda$$

Δ 와 Δt 는 공간 및 시간 단위격자 증가분을 나타내며 Courant 안정조건을 만족하도록 설정되었다. 자장의 관계식은 일반적인 매질에서의 관계식을 따른다. 본 논문에서 사용된 지하 매질의 전기적 특성이 그림 1에 주어졌 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 동작 주파수의 변화에 따른 상대 유전율의 변화는 지하 매질이 분산의 특성을 가짐을 뜻하며, 실험 도전율의 증가는 상대적인 신호 손실의 증가를 의미함을 알 수 있다. 즉, 시뮬레이션에 이용된 지하매질은 침투 깊이 및 동작주파수를 파라미터로 하며 분산 특성을 갖는 저역통과필터와 유사함을 알 수 있다.

흡수경계조건으로는 비교적 오차가 작은 PML (Perfectly Matched Layer)을 사용하였다. 사용된 PML은 지상 부분의 PML과 지하 매질 부분의

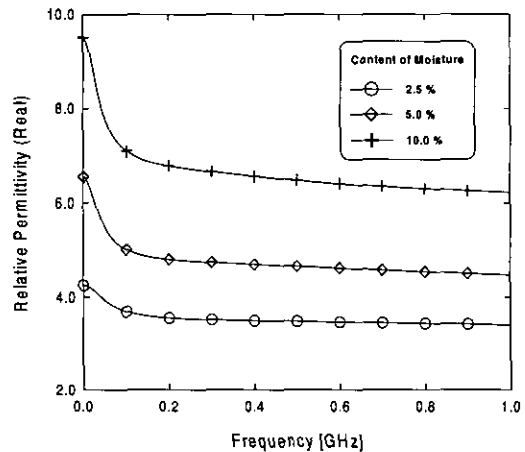


그림 1a. 수분 함유량 및 주파수 변화에 따른 지하매질의 유전율 변화도

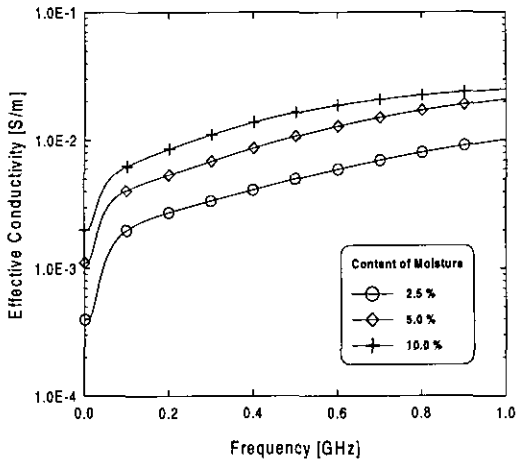


그림 1b. 수분 함유량 및 주파수 변화에 따른 지하매질의 실효 도전율 변화도

DPML (PML for Dispersive media)로 나뉠 수 있다. 이 두 가지 경계조건은 모두 매질 간의 임피던스 정합을 바탕으로 한 확장 좌표계(stretched coordinate)의 적용이라는 측면에서 기본 맥락을 함께한다. 본 논문에서 그 유도 과정과 결과식은 생략되었다⁵⁾.

Ⅲ. 지하 탐사용 레이더를 이용한 탐지과정

1. 레이더의 물리적 구성

지면 위에서의 레이더 탐지 과정을 2차원적으로 도시한 것이 그림 2에 주어져 있다. 레이더는 각각 저항 종단형(resistor loaded) bow-tie 안테나로 이루어진 송수신기 쌍으로 구성된다. 송수신 안테나의 급전점 사이의 이격 거리는 40 cm이고, 지면으로부터의 이격거리는 4 cm이다.

그림 3은 Bow-tie 안테나의 구조를 나타내고 있다

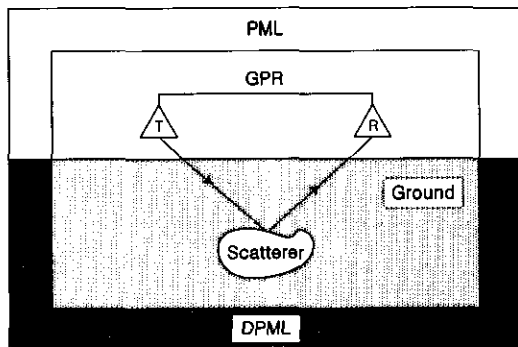


그림 2. 지면 위에서의 레이더 탐색 구성

그림에서 보이는 비와 같이 저항 종단 구조는 안테나의 전기적 특성 및 구조 등에 의해 결정되는 자기 공진 특성을 상대적으로 약화시켜 광대역의 펄스를 얻기 위함이다. 바꿔 말하면 안테나의 광대역 특성은 고유의 공진을 방해함으로써 얻어지는 특성이므로 펄스의 왜곡 방지가 과도하면 안테나의 감도가 떨어지게 되고, 결과적으로 미약한 산란 신호를 감지하지 못할 수 있게 되므로 주의하여야 한다. 지상으로의 방사가 불필요한 레이더의 사용 목적상 지면 아래로의 침투 전력을 높이기 위해 지면을 향하는 방향을 제외한 나머지 부분을 모두 완전 도체로 차폐시켰다. 시뮬레이션 상에서의 모든 구조물은 계단형 격자로 모델링되었다

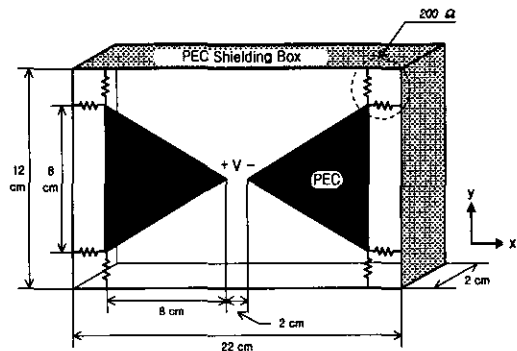


그림 3. 광대역 bow-tie 안테나의 구조

그림 3의 구조로 이루어진 bow-tie안테나의 자유 공간 방사 특성이 그림 4에 주어져 있다. 이때 θ , ϕ 의 방향은 일반적인 구 좌표계(spherical coordinate)를 따르며 안테나는 그림 3과 같은 방향으로 놓여져 있다.

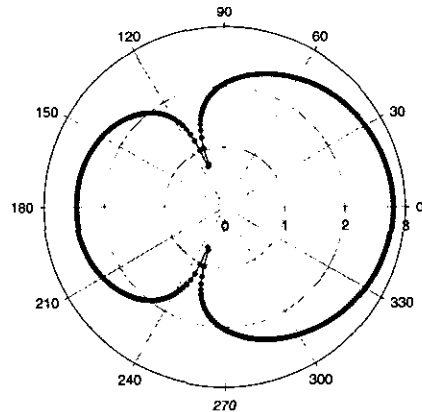


그림 4a. Bow-tie 안테나의 자유공간 방사특성; $\phi = 0^\circ$

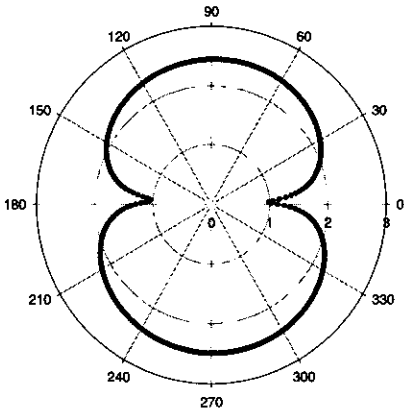


그림 4b. Bow-tie 안테나의 자유공간 방사특성; $\theta=90^\circ$

2. 상관함수를 이용한 산란체의 식별

본 논문에서 두 신호의 상관관계(correlation)를 이용한 일반적인 산란체의 식별은 그림 5와 같은 알고리즘으로 구성된다^[6].

그림 5에서 잡음과 기준신호는 각각 N개와 M개의 요소를 갖는 집합으로 나타나 있다. 그림 5의 알고리즘에서 문턱값(threshold level)의 설정은 산란체의 탐지에 중요한 역할을 한다. 일반적인 레이더 탐사환경은 잡음이 상주하는 환경으로 볼 수 있으며, 문턱값 설정 시 일정 수준 이상의 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio)는 탐지의 신뢰성 보장에 있어서 필수적이다. 즉, 너무 낮은 신호 대 잡음비 아래에서의 문턱값 설정은 의미가 없으며, 그에 따른 탐지 결과 또한 신뢰도가 떨어진다고 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 잡음환경이 탐지에 미치는 영향을 고려하기 위하여 N개의 요소로 이루어진 잡음신호 집합을 시뮬레이션에 도입하였다. 두 신호의 상관관계를 결정짓기 위해 필요한 기준신호(reference signal)는 실제적인 레이더 탐지 또는 탐색 환경에서 수신 안테나로 유입되는 특정 산란체에 의한 산란 신호가 된다.

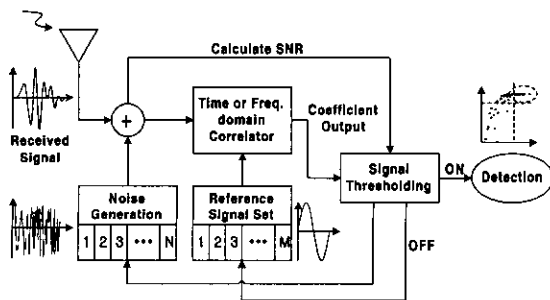


그림 5. 상관계수를 이용한 산란체의 식별방법

그림 5는 미리 준비된 기준신호와 수신신호 사이의 상관관계를 이용한 탐지 과정을 의미하고 있다. 특정 산란체의 식별을 위해 시뮬레이션에 사용될 몇 가지의 산란체가 그림 6에 주어졌다. 모든 산란체는 완전도체로 모델링 되었다.

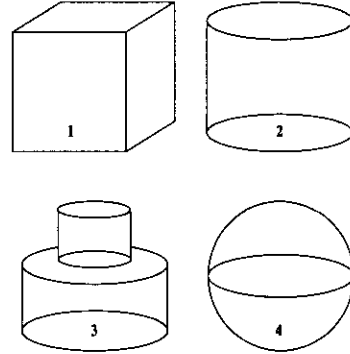


그림 6. 시뮬레이션에 사용된 산란체들

본 논문에서 고려한 잡음 환경은 다음과 같다. 우선 잡음신호 집합의 구성요소로는 랜덤함수를 이용한 식 (3)과 같은 유사 백색 잡음이 이용되었다.

$$S_{noise}(t, n) = \frac{S_{received}(t)}{10^{nr(n)/10}} (0.5 - R_{fn}(n)), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N_{max} \quad (3)$$

여기서 $S_{received}(t)$ 는 레이더 수신신호, $|R_{fn}(n)| \leq 1$ 인 랜덤함수를 의미하며, $N_{max} = 20, nr(n) = n - 10$ 인 값을 사용하였다. 수식에서 n 값을 변화시킴에 따라 서로 다른 신호 대 잡음비를 인위적으로 얻을 수 있음을 알 수 있다. 결국 기준신호와 상관관계를 도출하기 위해서 시뮬레이션에 사용된 잡음환경 하의 수신신호는 다음과 같이 구성된다.

$$S_{nr}(t, n) = S_{received}(t) + S_{noise}(t, n) = S_{received}(t) \left(1 + \frac{(0.5 - R_{fn}(n))}{10^{nr(n)/10}} \right) \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 계산된 신호 $S_{nr}(t, n)$ 와 기준신호 $S_{ref}(t)$ 와의 상관계수는 일반적인 상관관계를 정규화하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Cor\{S_{ref}, S_{nr}\}_n = \frac{\sum_t S_{ref}(t) S_{nr}(t, n)}{\sqrt{\sum_t S_{ref}(t)^2 \sum_t S_{nr}(t, n)^2}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N_{max} \quad (5)$$

식 (5)는 $-1 \leq Corr \leq 1$ 의 값을 갖는다. 비교하고자 하는 두 신호가 완전히 일치할 경우 1의 값을 가지고, 두 신호간의 위상차가 완전히 빗나가 있어서 서로 상쇄의 효과를 나타내는 경우는 -1의 값을 가진다. 결과값이 0이 되는 경우는 두 신호 사이의 상관관계가 전혀 없음을 의미한다.

수분 함유량 5%인 지하 10cm에 매설된 산란체들에 의한 레이더 수신신호가 그림 7에 주어졌다. 그림에서 산란체 번호는 그림 6에서의 산란체에 주어진 번호와 동일하다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 서로 다른 산란체로부터 산란된 신호는 각기 서로 다른 양상을 보이고 있다. 이러한 신호의 상이함은 그림 5의 알고리즘을 통한 산란체 탐지에 기본 원리가 된다. 산란체의 전기적 특성 및 지하매질의 전기적 특성이 시뮬레이션상에서 동일하므로 산란 신호 사이의 상이성은 서로 다른 산란체의 모양 때문이라고 볼 수 있다. 만약 산란체의 전기적 특성이 서로 다르다면 이 또한 서로 다른 산란 신호를 유기할 것이다.

본 논문에서는 상관계수의 도출에 있어서 수신신호의 주파수 영역 전력 스펙트럼 밀도는 사용하지 않았으나 그 원리는 시간영역에서의 도출 방법과 동일하다.

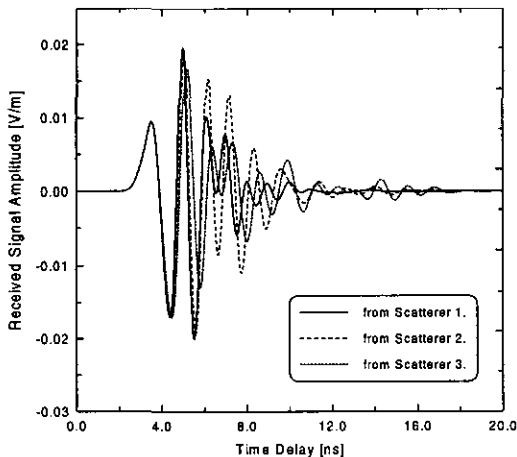


그림 7. 몇 가지 산란체에 대한 레이더 수신신호

그림 5의 알고리즘을 이용하여 몇 가지 매설된 산란체로부터 원하는 특정 산란체를 탐색한 결과가 그림 8에 주어졌다. 그림 8의 결과는 매설된 서로 다른 산란체로부터 수신된 신호들 사이의 상관계수를 잡음 신호의 크기에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 상관계수들의 번호는 각각 그림 6에서의

산란체 번호이며, 괄호 안의 앞의 숫자는 특정 산란체에 의한 기준신호를 의미하고 뒤의 숫자는 기타 다른 산란체에 의한 레이더 수신신호를 의미한다. 모든 산란체는 수분 함유량이 5%인 지하 10cm에 매설되어 있다.

그림에서 상관계수 (3,3)의 경우는 자기 상관 (autocorrelation)을 의미하며, 기준신호와 비교 대상이 되는 수신신호 사이의 일치성의 증가로 인해 거의 1에 가까운 값을 나타내고 있다. 이에 반해, 원하지 않는 기타 다른 산란체(1번, 2번, 4번 산란체)에 의해 유기되어 수신된 신호들과의 비교 결과에 비해 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 그림 5에서 제시한 탐지 알고리즘의 원리에 부합하는 결과이며, 시간 또는 주파수 영역에서의 신호들 사이의 상이성이 간단한 탐지에 응용될 수 있음을 의미한다. 또한 그림 8의 비교 결과들은 모두 신호 대 잡음비가 증가함에 따라 일정한 값으로 수렴을 하고 있으며, 이는 일정 수준 이상의 신호 대 잡음비 확보가 탐지 결과에 미칠 영향을 말해준다. 다시 말하면 신호 대 잡음비의 증가에 따른 결과 수치 편차의 감소는 그 수치를 탐지에 이용하는 방법에 있어서 신뢰도의 증가와 직결되는 것이라 볼 수 있다.

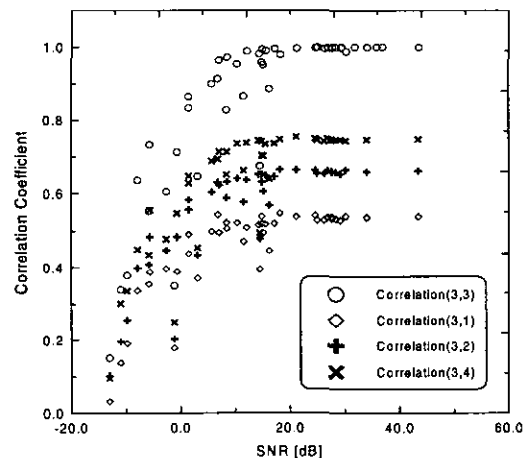


그림 8. 동일한 지하에 매설된 산란체 사이의 상관계수

그림 9는 수분 함유량이 서로 다른 지하 매질에 매설된 산란체들을 그림 5의 알고리즘으로 탐색한 결과를 나타낸다. 탐지를 위해 사용된 기준신호는 수분 함유량이 5%인 지하에 매설된 3번 산란체에 의한 유기되어 레이더로 수신된 수신신호이고, 나머

지 비교 대상 신호들은 모두 10%의 수분 함유량을 가지는 지하에 매설된 산란체로부터의 수신신호로 구성되어 있다. 그림에서 탐지결과 (3,3)의 경우 자기 상관임에도 불구하고 그림 8에서와 같은 바람직한 결과를 얻지 못한 이유는 기준신호와 비교신호를 얻는 과정에서의 지하매질이 서로 달랐기 때문이다. 그림 1에 주어진 수분 함유량에 따른 지하매질의 전기적 특성의 변화에 따라서 전파시간의 지연으로 인한 시간영역에서의 두 신호간의 위상 불일치와 신호의 감쇠를 탐지 실패의 구체적인 이유로 들 수 있다. 결과적으로는 기준신호와 수신신호를 얻는 과정에서의 매질 조건이 서로 다른 경우 비록 동일한 산란체에 의해 유기된 신호를 이용했다 하더라도 그림 8과 같은 탐지 결과를 얻을 수 없으며, 특정 산란체의 탐색에 있어서 산란체의 종류 뿐만 아니라 산란체가 매설된 주변 매질의 영향 또한 신중히 고려해야 함을 알 수 있다. 이러한 경우 일정 수준 이상의 신호 대 잡음비 아래에서 설정된 문턱값 이상을 탐지에 이용하기 위해서는 그림 8에서 선택된 것과는 다른 기준신호, 즉, 찾고자 하는 산란체가 10%의 수분이 함유된 지하에 매설되었을 때 유기된 신호를 탐지에 적용해야 함을 알 수 있다.

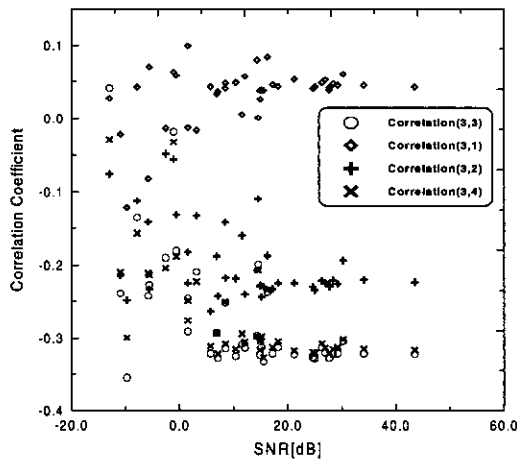


그림 9. 수분 함유량이 서로 다른 지하에 매설된 산란체 사이의 상관계수

V. 결론

본 논문에서는 신호 간의 상이성이 지하에 매설된 특정 산란체의 탐지에 응용될 수 있음을 제시하였다. 시뮬레이션을 통해 다양한 산란체에 의해 생

성되는 산란 신호들 사이의 상이함이 상관함수를 통해 서로 다른 일정한 값으로 분리되며, 이 값을 레이더를 이용한 매설체 탐지에 이용될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 산란체 주변의 전파 경로상에 존재하는 매질의 특성을 탐지 과정에서 신중히 고려하여야 함을 알 수 있었다. 레이더를 이용한 지하 탐사 과정의 특성상 지하매질의 성질을 사전에 정확히 분석한다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 탐지의 정확성을 높이기 위해서는 탐지하고자 하는 산란체의 특성에 따른 기준신호 집합의 사전 확보가 중요하며 이는 좀더 나은 탐지 결과를 유도할 것으로 예측된다.

참고 문헌

- [1] D. J. Daniels, *Surface Penetrating Radar*, The Institution of Electrical Engineers, London, pp. 192-255, 1996.
- [2] F. L. Teixeira and W. C. Chew, "Finite-difference time domain simulation of ground penetrating radar on dispersive, inhomogeneous and conductive soils," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, No. 6, pp. 1928-1936, Nov, 1998.
- [3] 김동호, 이승학, 김채영, "지하탐사용 레이더를 이용한 지하 구조물의 위치 파악법 및 근사 이미지 추출법," *한국전자과학회논문지*, 제11권 제4호, pp. 565-574, June, 2000.
- [4] D. F. Kelly and R. J. Luebbers, "Piecewise linear recursive convolution for dispersive media using FDTD," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 44, No. 6, pp. 792-797, Jun, 1996.
- [5] F. L. Teixeira and W. C. Chew, "Perfectly matched layer and piecewise-linear recursive convolution for the FDTD solution of the 3D dispersive half-space problem," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 34, No. 5, pp. 2747-2750, Sept., 1998.
- [6] J. D. Taylor, *Introduction to Ultra-wideband Radar Systems*, CRC Press Inc., pp. 491-577, 1995.

김 동 호(Dong-ho Kim) 정회원
1998년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
2000년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
2000년 3월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 표준연구센터
기술기준연구팀 연구원
<주관심 분야> 역 산란 해석, 레이더 탐사, 안테나
공학, 전파 환경 해석

조 평 동(Pyung-dong Cho) 정회원
1980년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1995년 2월 : 충남대학원 컴퓨터과학과 졸업
(이학석사)
1980년~1997년 : ISDN, 지능망, 통신처리시스템
개발
1998년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 표준연구센터
기술기준연구팀장
<주관심 분야> 전기통신 기술기준, 통신망 생존성,
지능망, 광 전달망