

## 걸음주파수연속파지면투과레이다체계설계의 한가지 방법

변학철, 안웅남

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《정보기술, 나노기술, 생물공학을 비롯한 핵심기초기술과 새 재료기술, 새 에너지기술, 우주기술, 핵기술과 같은 중심적이고 견인력이 강한 과학기술분야를 주타격방향으로 정하고 힘을 집중하여야 합니다.》

땅속에 묻혀있는 지뢰, 여러가지 광물들, 지하수, 각종 관류 등의 탐색, 물속 또는 얼음속밑의 지층조사, 콘크리트구조물의 결함탐지(비행장활주로, 도로, 철길로반, 건물) 등에 리용하는 첨단전자장치인 지면투과탐지기의 설계에 대한 여러가지 제안들이 제기되고있다. 선행한 임펄스방식의 지면투과탐지기는 높은 출력을 요구하고 분해능이 높지 못한것으로 하여 걸음주파수연속파방식의 지면투과탐지기가 많이 연구되고있으며 최근에는 임펄스방식과 주파수변조연속파방식, 걸음주파수연속파방식을 결합한 지면투과탐지기방향으로 연구사업이 진행되고있다.[1-3]

론문에서는 걸음주파수연속파방식의 지면투과탐지기체계설계의 한가지 방법을 제기하였다.

### 1. 지면투과레이다의 체계특성

지면투과레이다의 체계설계를 위해서는 설계하려는 레이다의 기술적성능을 결정하여야 하는데 그러자면 레이다의 측정범위를 결정하여야 한다. 지면투과레이다의 측정범위를 결정하기 위해서는 전체적인 경로손실과 물질에 의한 손실, 분산손실, 목표반사손실(산란손실)이 결정되어야 한다.

대부분의 경우 지면투과레이다에서 목표는 가까운 마당과 프레넬구역에 놓인다. 지면투과레이다의 수신기에서 검출된 신호는 송신기로부터 수신기까지의 전파과정에 여러가지 손실을 입는데 총체적인 손실은 다음의 식에 의하여 결정된다.

$$L_T = L_e + L_m + L_{t1} + L_{t2} + L_s + L_a + L_{sc} \quad (1)$$

여기서  $L_e$ 는 안테나효율에서의 손실[dB],  $L_m$ 은 안테나부정합손실[dB],  $L_{t1}$ 은 공기로부터 매질까지의 전송손실[dB],  $L_{t2}$ 는 매질로부터 공기까지의 전송손실[dB],  $L_s$ 는 안테나분산손실[dB],  $L_a$ 는 재료에서의 감쇠손실[dB],  $L_{sc}$ 는 목표에서의 산란손실[dB]로서 이것들은 100MHz의 고정된 주파수에서 평가할수 있다.

일반적으로 손실을 정확히 결정하기 위해서는 넓은 주파수대역에서 고찰하는것이 필요하다.

우리가 설계하려는 지면투과레이다는 라선형미소피안테나를 리용하는 걸음주파수연속파레이다이며 목표지면으로부터 1m깊이에 있는 평면형경계면을 가진다.

이때 평면형경계면의 측면은 무한하다고 보았다.

이 경우 토양의 첫층에서  $\epsilon_r = 9$ ,  $\tan \delta = 0.1$ , 둘째 층에서는  $\epsilon_r = 16$ ,  $\tan \delta = 0.1$ 이며 토양의 첫번째 층의 완전저항은 100MHz에서  $125\Omega$ , 둘째 층에서는  $89\Omega$ 이다.

총체적인 손실을 결정하기 위하여 식 (1)의 개별적인 손실을 고찰하면 다음과 같다.

① 안테나효률손실

미소피라선형안테나의 경우에 안테나의 손실은  $-4\text{dB}$ 이다.

② 안테나부정합손실

안테나부정합으로부터 반사로 인한 손실은 대단히 낮은 출력이므로 보통  $-1\text{dB}$ 로 한다.

③ 송신결합손실

안테나가 물질의 표면에서 동작하는 경우에 안테나로부터 물질까지의 전송손실은 다음의 식에 의해 결정된다.

$$L_{t1} = -20 \lg \left( \frac{4Z_m Z_a}{|Z_m + Z_a|^2} \right) \quad (2)$$

여기서  $Z_a$ 는 공기의 특성완전저항,  $Z_m$ 은 물질의 특성완전저항이다.

대부분의 땅에서

$$Z_a = 377\Omega, Z_m = 125\Omega$$

이며  $L_{t1} = -2.5\text{dB}$ 이다. 그리고 되돌이결합손실도  $L_{t2} = -2.5\text{dB}$ 이다.

④ 분산손실

안테나의 분산손실은 거리의 4제곱에 반비례한다.

$$L_s = -10 \lg \left( \frac{G_t A_r \sigma}{(4\pi R^2)^2} \right) = -21\text{dB}$$

⑤ 목표분산손실

재료와 평면이 접촉되는 경우에 경계면의 측면크기와 과부하가 크므로 목표분산손실은 다음과 같이 표시된다.

$$L_{sc} = -20 \lg \left( 1 - \left| \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right| \right) + 21 \lg \sigma \quad (3)$$

여기서  $Z_1$ 은 재료의 첫층의 특성완전저항,  $Z_2$ 는 재료의 둘째 층의 특성완전저항,  $\sigma$ 는 목표레이다교차단면이다.

첫층과 둘째 층사이의 경계면에서  $L_{sc}$ 는  $-1.6\text{dB}$ 이다. 이때 전파매질이 무한유전체반파장공간과 등가이므로  $\sigma$ 는  $0\text{dB}$ 로 본다. 이 경우 경계면의 물리적크기와 불규칙성은 작고 목표분산손실  $L_{sc}$ 는 매질의 기하학적형태로 하여 커지며 따라서 반사신호는 보다 작아진다.

한편 일부 조건에서 불규칙성의 물리적크기는 공진구조를 만들며 이것은 반사신호의 준위를 크게 하고 목표분산손실을 감소시킨다. 이것은 공진특성과 반사된 웨블레트파의 상대위상을 조사하는것에 의해 공기를 짝 채운 통과 물을 짝 채운 통을 구별할수 있게 한다.

⑥ 재료감쇠손실

여러가지 재료에서의 감쇠손실을 표 1에 주었다.

표 1. 여러가지 재료에서 감쇠손실

재료	100MHz에서의 손실/(dB·m <sup>-1</sup> )
습한 진흙	5~300
습한 땅(배흙)	1~60
건조한 모래	0.01~2
얼음	0.1~5
신선한 물	0.1
바다물	100
건조한 콘크리트	0.5~2.5
벽돌	0.3~2.0

⑦ 전체 손실

$Z_1 = 125\Omega$ ,  $Z_2 = 89\Omega$ 인 경계면으로부터의 반사와 감쇠가 2.7dB/m인 재료의 1m깊이로 100MHz의 주파수신호를 전송할 때 나타나는 전체 손실은 다음과 같다.

$$L_T = L_e + L_m + L_{t1} + L_{t2} + L_s + L_a + L_{sc} =$$

$$= -4\text{dB} - 1\text{dB} - 2.5\text{dB} - 2.5\text{dB} - 21\text{dB} - 5.5\text{dB} - 1.6\text{dB} = -38\text{dB}$$

⑧ 전파속도와 유도된 전자기파의 침투깊이

같은 종류의 등방성매질에서 상대전파속도와 유도된 전자기파의 침투깊이는 다음과 같이 계산할수 있다.

$$V_r = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad d = V_r \frac{t}{2}$$

여기서  $\epsilon_r$ 는 상대유전률,  $t$ 는 목표로부터 레이다까지의 전파통과시간이다.

주파수가 100MHz일 때 재료에 따르는 전파특성은 표 2와 같다.

표 2. 주파수가 100MHz일 때 재료에 따르는 전파특성

재 료	상대유전률	전파속도/(cm·ns <sup>-1</sup> )	침투깊이/cm
공기	1	30	30
콘크리트	9	10	10
신선한 물	80	3.3	3

여기로부터 걸음주파수권속파지면 투파레이다의 기술적특성을 다음과 같이 설정하였다.

대역너비: 100~1 400MHz

주파수분해능: 1kHz이상으로 임의로 설정가능

주파수안정도: 100Hz@1 000MHz

주파수설정시간: 최소 9μs, 1회주사시간: 1s이하

송신출구출력: 20dBm이상

스펙트르손도: -100dBc

동적범위: 60dB

직접파제거깊이: 20dB

## 2. 지면투과레이다설계

### ① 체계구성

SFCW레이다에서는 목표에서 반사된 신호의 위상편위로부터 거리정보를 얻어낸다.

송신신호  $E_t e^{-j\omega t}$  는 일정한 거리에 있는 목표에 의하여 반사되는데 경계면이 복소수 반사계수  $S$ 를 가지므로 수신된 신호는 다음과 같이 된다.

$$E_r = S E_t e^{j(2\beta d - \omega t)} / d^2 \quad (4)$$

여기서  $\beta$ 는 매질속에서의 전파상수이다.

이때 여러개의 목표들이 있다면 반사신호들은 진폭과 위상의 합성신호로 나타나는데 이것을  $N$ 개의 계단으로 주파수를 계단화하고 푸리에변환을 진행하면 개별적인 목표들이 식별되며 목표들사이의 거리간격  $\Delta Z$ 는 푸리에합렬에 기초하여 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta Z = c / (2\Delta f N \sqrt{\epsilon_r}) \quad (5)$$

여기서  $\Delta f$ 는 주파수계단,  $N$ 은 전체 주파수계단수,  $\epsilon_r$ 는 전파매질의 상대유전률,  $c$ 는 진공속에서의 빛의 전파속도이다.

매질속에서 계단주파수레이다에 대응하는 비모호성거리범위는 다음과 같이 된다.

$$R_{\text{비}} = (N-1)\Delta Z \quad (6)$$

이러한 분해능과 비모호성거리범위를 보장하기 위한 대역너비는 다음과 같이 된다.

$$B = (N-1)\Delta f \quad (7)$$

따라서 대역너비의 가장 낮은 주파수는  $f_0$ 이며 가장 높은 주파수는  $f_0 + (N-1)\Delta f$ 로 된다. 위에서 설정한 기술적특성을 고려한 걸음주파수연속파레이다의 체계구성도는 그림 1과 같다.

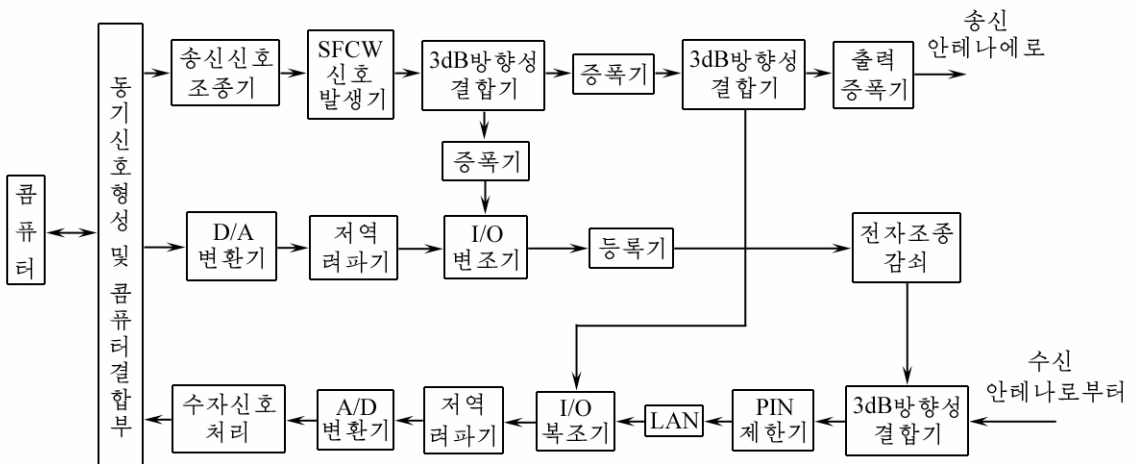


그림 1. 걸음주파수연속파레이다의 체계구성도

### ② 송신기의 설계

걸음주파수연속파레이다에서 송신주파수의 설정은 표 3과 같이 한다.

표 3. 송신주파수와 탐측깊이와의 관계

탐측깊이/m	송신 주파수/MHz
0.5	1 000
1.0	500
2.0	200
5.0	100
10	50
30	25
50	10

설계하려는 송신기의 기술적특성은 다음과 같다.

변조방식: 계단주파수변속과방식

신호원실험방식: 소수 $N$ 분주기를 리용한 위상고정고리방식

주파수대역: 100~1 400MHz(웃주파수는 임의로 설정가능)

주파수설정최소걸음: 1kHz(걸음값은 임의로 설정가능)

위상잡음:  $-100\text{dBc/Hz}@10\text{kHz}$

출구출력: 1W

직접파제거방식: RF단에서 제거

송신기의 구성도는 그림 2와 같다.

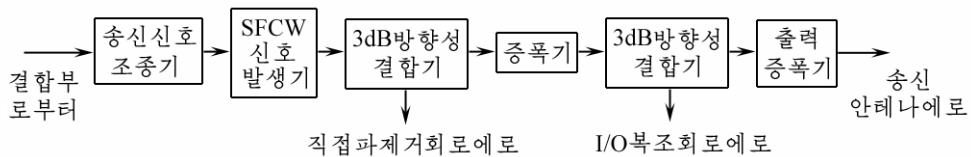


그림 2. 송신기의 구성도

계단주파수발생기는 ADF5355를 리용한다. 이 소자는 광대역고주파신호합성소자로서 소수 $N$ 분주기를 리용한 위상고정고리주파수합성기와 전압조종발진기를 집적화한 소자이다. 주파수설정은 SCI통신방식으로 진행하며 주파수설정시간을 최소  $9\mu\text{s}$ 까지 보장할수 있다. 또한 주파수설정시간을 최소값보다 큰 값으로 임의로 프로그램적으로 설정할수 있으므로 지면투과레이다의 신호원천으로 리용하는데 합리적이다.

송신신호조종기는 신호발생기의 주파수설정시간, 주파수대역, 계단주파수, 주파수걸음을 임의로 설정하기 위하여 ADF5355의 동작과정을 조종한다.

신호발생기의 뒤에 있는 3dB방향성결합기는 직접파제거를 위한 직교변조기의 기준신호를 얻기 위한것이고 출력증폭기의 앞에 있는 3dB방향성결합기는 수신기의 직교복조기에 필요한 고주파기준신호를 얻기 위한것이다. 3dB방향성결합기는 미소퍼선로구조로 실현된다.

### ③ 수신기의 설계

설계하려는 수신기의 기술적특성은 다음과 같다.

수신기구성방식: 령중간주파수방식

수신기동적대역: 60dB

수신기입구감도:  $-100\text{dBm}$

수신기주파수대역: 송신주파수대역과 일치  
 신호처리방식: 상관신호처리방식과 수자신호처리방식결합  
 수신기의 구성도는 그림 3과 같다.

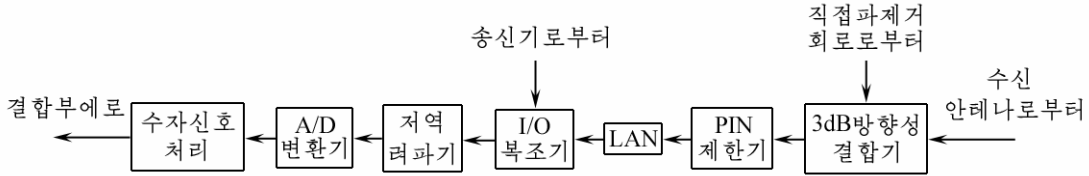


그림 3. 수신기의 구성도

수신기의 입구에 연결된 방향성결합기는 직접파제거회로에서 형성된 제거벡터신호를 수신통로와 결합하는 기능을 수행한다.

PIN제한기는 초기교정과정에 수신기의 입구로 들어오는 큰 신호로부터 저소음증폭기를 보호하여 수신기의 동적대역을 보장한다.

I/Q복조기는 수신신호로부터 목표정보를 담고있는 유효신호검출을 진행한다. A/D변환기는 수자신호처리를 진행하기 위하여 복조기출구의 상사신호를 수자신호로 변환한다. A/D변환기의 표본화주파수를 필요에 따라 가변할수 있게 한다. 수자신호처리는 장치적인 처리와 프로그램적인 처리를 결합하여 진행한다.

직교복조기로서는 HMC5971p4를 리용한다.

#### ④ 직접파제거회로의 구성

송수신호상결합으로 일어나는 직접파의 제거를 RF단에서 진행한다. 직접파제거회로의 핵심은 광대역직교변조기이다.

송신신호의 일부를 직교변조기에 필요한 기준RF신호로 리용하는데 이 기준신호는 광대역 90°출력분배기에 가해진다.

I/Q통로의 진폭조종은 D/A변환기를 리용하여 실현한다. 직교변조기의 출구신호는 감쇠기를 통과한 후 방향성결합기를 거쳐 수신기의 RF단에 결합되어 직접파의 제거를 실현한다. 교정후 직교변조기는 고정진폭위상이동기로 동작한다.

직접파제거회로의 구성도는 그림 4와 같다.

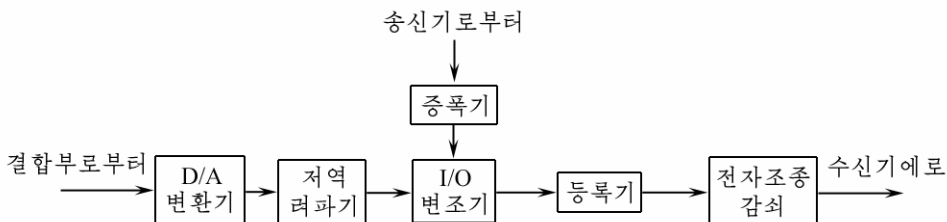


그림 4. 직접파제거회로의 구성도

직접파제거회로는 직교변조기와 전자조종감쇠기를 리용하여 진폭과 위상이 조종되는 직접파제거벡터신호를 형성한다.

## 맺 는 말

지면투과레이다신호가 받게 되는 총체적인 손실을 계산하고 선정된 기술적특성에 기초하여 걸음주파수련속파지면투과레이다의 체계를 설계하고 실현하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. Cherniakov et al.; IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 37, 2, 835, 1999.
- [2] D. J. Daniels; Ground Penetrating Radar, John Wiley & Sons, Inc., 120~152, 2004.
- [3] L. Fu et al.; IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7, 3, 701, 2014.

주체108(2019)년 8월 5일 원고접수

## A Method on System Design of SFCW-GPR

*Pyon Hak Chol, An Ung Nam*

We studied on the computation of the total loss for GPR signal and designed the system of SFCW-GPR with our Technology character.

Key words: GPR, SF