전파환경분석을 통한 방향탐지기 최적배치에 관한 연구

Optimal Disposition of Direction Finder using EM Wave Propagation Analysis

양 종 원* 최 준 호* 권 도 백** 강 희 석*** 박 철 순*
Yang, Jong-Won Choi, Jun-Ho Kwon, Do-Baeg Kang, Hee-Seog Park, Cheol-Sun

ABSTRACT

This paper introduces the optimal disposition of direction finder using EM(Electro-magnetic) wave propagation analysis which is based on LR(Longley-Rice) propagation model and the characteristics of direction finder, emitter and terrain. Initial model is simulated and modified to minimize propagation error as a result of the field trials. Proposed analysis used line-of-sight analysis and mountain-top extraction algorithm to optimize the disposition in the assigned area and the result can be displayed in the 3D map in order of the percentage coverage for direction finding possibility area.

주요기술용어(주제어) : Direction Finder(방향탐지기), ES(전자전지원), Optimal Disposition(최적배치), EM Wave Propagation Analysis(전파환경분석)

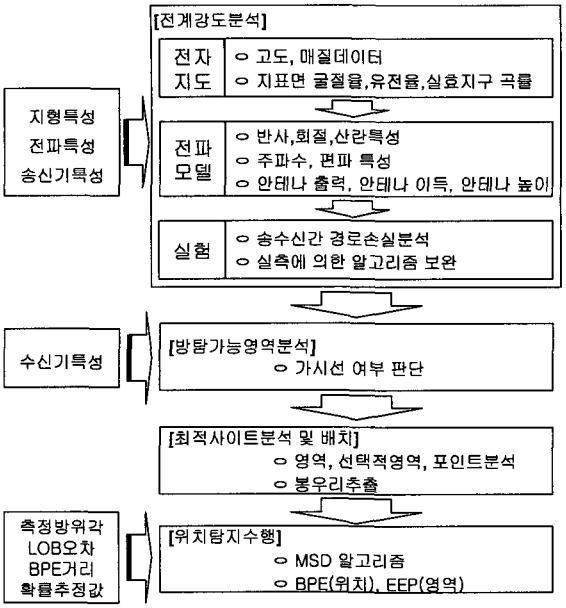
1. 머리말

통신전자전 분야의 ES(Electronic Support)는 안테나를 통해 수신된 신호에 대해 탐색, 방향 탐지(이하 방탐), 감청 임무를 수행하여 전자전체계의 상황분석, 표적 개발 및 재밍 등의 다양한 임무를 가능케 한다[1].

그 중 방탐기의 방탐 능력은 실전 배치에 있어서 자체성능 뿐만 아니라 다중 위협 환경과 작전 지역의 지형조건에 영향을 받는다[2]. 즉, 전파 및 지형 특성에 의해 방탐 및 위치탐지 정확도가 달라지므로 효과적인 방탐이 이루어지기 위해서는 이러한 특성을 고려하여 방탐기를 최적사이트에 배치할 필요가 있다. 특히 산악지형이 많은 우리나라의 특성상 이를 고려한 배치전 사전분석이 중요함에도 불구하고 방탐기 최적배치에 대한 기능이 미비한 관계로 해당지역에 대한 숙련된 경험자의 육안 확인 및 배치 후 실험 결과에 의존하고 있어 배치에서 운용까지 많은 시간이 소요되며 작전지역 변동에 의한 능동적인 대처가 어렵다. 따라서 배치 전 사전분석이 가능하다면 해당 지역에 대한 임무 수행에 많은 시간과 노력을 절감함으로써 작전효율을 높일 수 있을 것이다.

본 논문에서는 방탐기의 운용 정확도를 높이기 위해서 그림 1과 같이 전파환경 및 지형특성을 고려한 전파환경분석을 이용하여 최적 배치를 제시하고자 한다. 전파환경분석은 빠른 처리속도를 제시할 수 있는 LR(Longley-Rice)모델을 기본으로 실측을 통해 값을 비교하여 선행계산요소부분과 결과에 중요한 영향을

† 2007년 1월 19일 접수~2007년 4월 3일 게재승인
* 국방과학연구소(ADD)
** (주)넥스원퓨처(LIG NEX1)
*** (주)에이알비전(AR VISION)
주저자 이메일 : alfred@add.re.kr



[그림 1] 방탐기 최적배치 흐름도

미치는 알고리즘의 파라미터들을 수정, 보완하여 해당지형에 맞도록 하였으며[3~5], 지형특성은 3차원 전자지도를 이용하여 매질, 고도 등의 정보를 이용하여 가시선 분석 및 봉우리추출을 수행하였다. 또한, 송·수신기 및 주파수 특성을 적용하여 방탐가능영역을 분석하고 그 분석 결과를 우선 순위별로 나열하여 방탐기에 대한 최적의 배치 위치를 효율적으로 산출하도록 하였다[6~8].

2. 전파환경분석

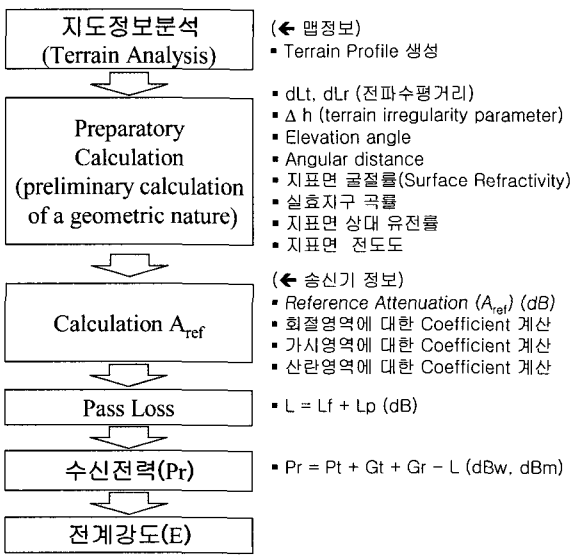
가. LR모델을 통한 전파환경분석

방사신호원으로부터 복사되는 전자파의 전계강도를 예측하는 전파 모델(propagation model)의 연구는 크게 송수신 전파 경로상의 2차원 또는 3차원 지형정보를 상세히 반영하기 위하여 맥스웰 방정식 및 파동방정식을 이용한 해석적인 방법과 수신전력 또는 전계강도의 측정을 통한 데이터를 수집하여 이를 근거로 경험식을 개발하는 방법으로 분류될 수 있다. 본 논문에서는 과도한 계산 시간이 소요되는 2차원 또는 3차원 광선추적기법(Ray Tracing Technique)등의 해석적인 방법보다는 오차가 따르더라도 작전지역에 대한 신속한 응답을 특성을 보이는 LR(Longley-Rice) 모델을 적용하였다[3]. 이는 주파수 20MHz~20GHz까지, 전송거리는 1~2,000km, 그리고 안테나의 높이는 1~3,000m의 범위 내에서 적용이 가능하며, 송신 및 수신 위치가 결정되면 3차원 디지털 지형정보를 이용하여 전파 경로상의 고도 및 지형 정보를 반영하여, 측정된 데이터로부터 유도된 경험식으로부터 전파 손실을 예측할 수 있다.

LR모델을 이용한 전파환경분석 흐름도는 그림 2와 같다. 전자지도 상의 지도정보를 이용하여 해당 지역에 대한 선행계산요소를 LR모델의 입력값으로 사용하고 송신기 정보를 이용하여 전파특성에 대한 변수를 추출한다. 전파환경분석을 수행하기 위한 LR모델의 수신 전력(dBw)은 자유공간 및 지형에 의한 전파 손실을 고려하여 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L \tag{1}$$

이때 t는 송신측, r은 수신측, G_t는 송신측 이득, G_r은 수신측 이득, L은 전체 전파손실(total propagation loss)로서 $L = L_f + L_p$이며 L_f는 자유공간 전파 손실(free space loss), L_p는 지형에 의한 경로손실이다.



[그림 2] 전파환경분석 흐름도

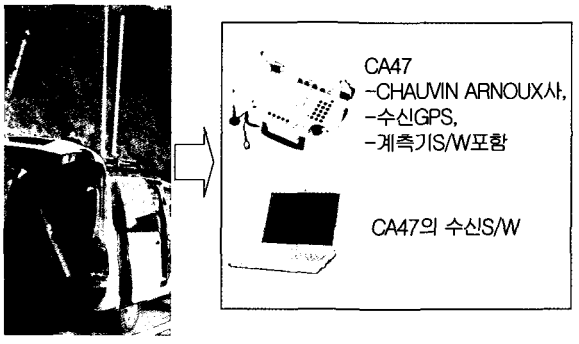
나. 실측 장비 환경 구성

LR모델을 통한 전파환경분석 수행 결과를 분석하기 위하여 실측을 수행하였으며 실측지역에 대한 실험 환경은 다음과 같다.

□ 지역 : 충남 ○○지역
□ 송신부 구성
- 송신부 1 : 3.16W(27MHz), 13m(안테나 높이)
- 송신부 2 : 1kW(94MHz), 20m(안테나 높이)
- 송신부 3 : 5kW(98MHz), 20m(안테나 높이)

□ 수신부 구성 및 측정

CHAUVIN ARNOUX사의 CA47(수신 GPS, 계측기 S/W포함)을 아래 그림 3과 같이 차량에 탑재하여 해당 지역을 이동하면서 측정하였다.



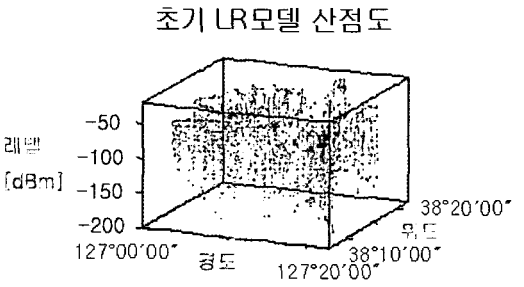
[그림 3] 전파환경분석 수신부 구성

3. 모델링 알고리즘 실측 결과분석

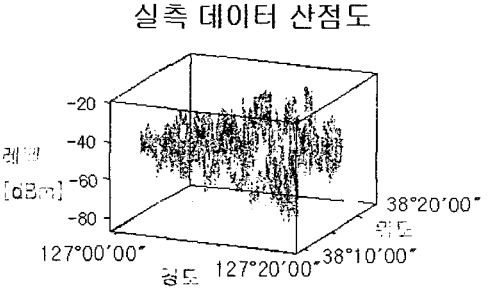
가. 초기 알고리즘과 실측값 비교

그림 4와 그림 5는 98 MHz에서의 경도, 위도에 따른 수신레벨(식 (1)의 P_r)산점도를 알고리즘과 측정값을 비교한 것이며 알고리즘에 의한 전계강도값이 실측값에 비해 -100dBm 아래로 많이 분포함을 알 수 있다.

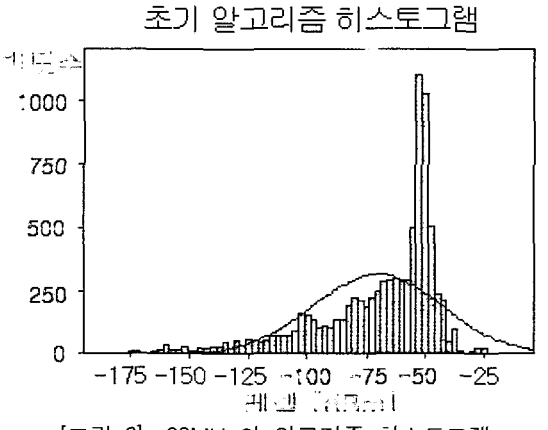
그림 6과 그림 7은 98MHz에서 해당 지역에서의 수신레벨별 누적값을 알고리즘과 측정값을 비교한 것이다. 초기 알고리즘은 수신레벨이 넓은 범위에 있어서 퍼져있으며 특정 레벨(-55dBm)에서 빈도가 높고 산포가 컸으나 실측값의 히스토그램은 좁은 범위내에서 정규분포 형태를 이루는 것을 확인할 수 있었으며 이러한 알고리즘과 실측값에 대한 오차를 줄이기 위해 알고리즘의 보완을 수행하였다.



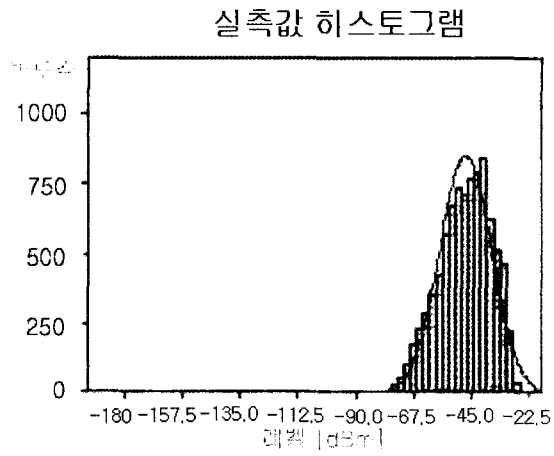
[그림 4] 98MHz의 알고리즘 산점도



[그림 5] 98MHz의 실측값 산점도



[그림 6] 98MHz의 알고리즘 히스토그램



[그림 7] 98MHz 실측값 히스토그램

나. LR모델의 보완

실측한 데이터를 토대로 초기 LR모델에 대한 보완을 아래와 같이 수행하였다.

1) 고도 보상에 의한 점대점 모드의 사용

LR모델에서는 해당 지점에서의 DTED 데이터를 정확히 알고 있을 때에는 점대점 모드(point-to-point mode)로 수행되고 DTED가 명확하지 않을 때는 영역모드(Area Mode)로 수행된다. 이는 식 (2)~(7)과 같이 송신 및 수신 전파가시거리와 수평고도각에 영향을 준다.

■ 영역모드

송신 및 수신 전파가시거리 d_{Lt}와 d_{Lr}(경험식)

$$d_{Lj} = d_{Lsj} \exp\left[-0.007\sqrt{\frac{\triangle h}{\mathrm{Max}(h_{ej}, 5\mathrm{m})}}\right] \quad (2)$$

송신 및 수신 측의 수평고도각

$$\theta_{ej} = \left[0.65\triangle h\left(\frac{d_{Lsj}}{d_{Lj}} - 1\right) - 2h_{ej}\right] / d_{Lsj} \quad (3)$$

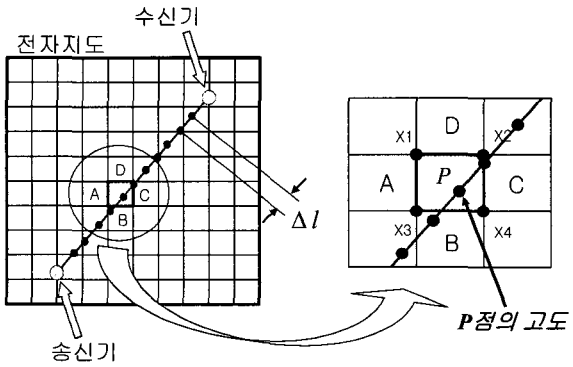
j는 t 또는 r이다.

■ 점대점 모드

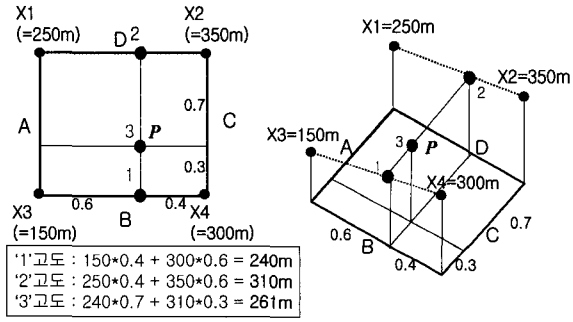
송신 및 수신 전파가시거리 d_{Lt}와 d_{Lr}

$$d_{Lst} = \sqrt{2h_{et}\, a_e} \quad (4)$$

$$d_{Lsr} = \sqrt{2h_{er}\, a_e} \quad (5)$$



[그림 8] 송,수신기 직선구간의 고도보상



[그림 9] 고도보상의 적용 일례

송신 및 수신 측의 수평고도각

$$\theta_{et} = \frac{h_{Lt} - h_{ts}}{d_{Lt}} - \frac{d_{Lt}}{2a_e} \quad (6)$$

$$\theta_{er} = \frac{h_{Lr} - h_{rs}}{d_{Lt}} - \frac{d_{Lr}}{2a_e} \quad (7)$$

송신기와 수신기에 대한 직선구간에서의 실효높이에 대해 기존에는 가장 근접한 곳의 높이에 대해 영역모드를 사용하였으나, 고도 보정을 수행한 후 점대점 모드로 수행하였다. 즉, 그림 8 및 그림 9에서처럼 송신기와 수신기 사이의 Δl 거리만큼씩의 고도데이터를 추출하여야 하지만 DTED해상도의 차이로 인해 각 지점에 대한 정확한 고도를 알지 못하므로 초기에는 가장 가까운 고도데이터를 적용하여 영역모드로 수행하였으나, 표 1과 같이 해당지점에 대한 고도보정을 수행한 고도를 적용함으로써 점대점모드를 적용하였다. 일례로 그림 9의 P점에 대한 고도를 적용할 경우 보완전에는 가장 가까운 고도인 X4(=300m)를

[표 1] 고도데이터 보상에 의한 LR모델보완

구 분	보완 전	보완 후
모드적용	영역모드 (Area mode)	점대점모드 (Point-to-point mode)
DTED데이터	해당지점에서 가장 가까운 고도데이터 적용	해당지점에 고도 보상한 데이터 적용

적용하였으나 해당 지점의 DTED데이터(X1~X4)에 대한 거리비율(X3:X4=6:4, X2:X4=7:3)에 따른 고도 보정을 수행하여 P(=261m)점의 고도를 산출하여 적용하였다.

2) Correction factor 값(c_f)의 변경

LR모델에서는 실험을 통해 전체적인 Loss값을 조절하는 방법으로 식 (8), (9)와 같이 안테나 높이에 Correction factor를 주는 방법이 있다. 이는 0~1사이의 값으로 구성되며 초기 LR모델에선 0.1을 사용하였으나 실험을 통해 실측과의 차가 가장 적은 값인 0.2로 보완하였다.

$$h_{et} = h_{gt} + c_f h_1 \tag{8}$$

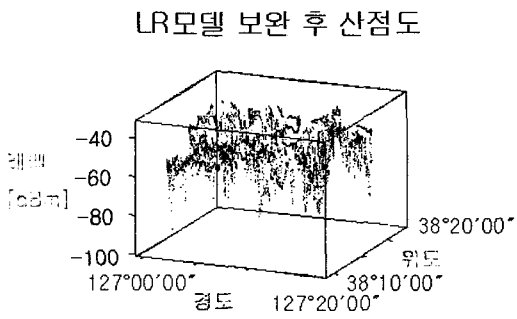
$$h_{er} = h_{gr} + c_f h_{N+1} \tag{9}$$

이때 h_e는 안테나 실효높이, t는 송신측, r은 수신측이다.

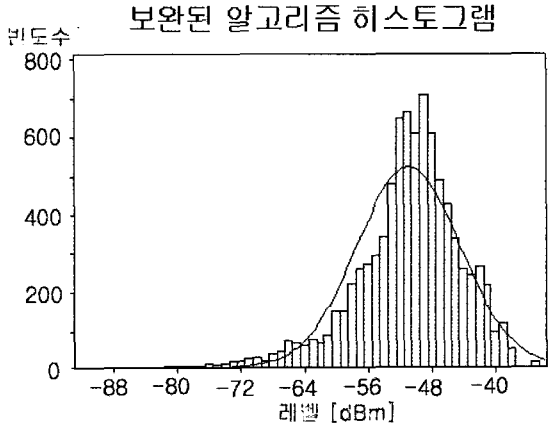
3) 송신기의 정확한 안테나 파라미터값 입력

초기 LR모델에서 27MHz의 안테나 출력을 30W로 계산을 하였으나 실측은 3.162W인 것을 알 수 있었다. 94/98MHz대역은 큰 출력값을 적용하기 위하여 상용 공중파 송신기를 사용할 수밖에 없었으며 출력단 측정이 제한되어 사양에 나와 있는 1kW/5kW값을 그대로 적용하였으나 정확한 측정을 수행한다면 오차를 더 줄일 수 있을 것이라 판단된다.

LR모델 보완 후의 98MHz에 대한 산점도 및 히스토그램은 그림 10 및 그림 11과 같으며 이는 초기 알



[그림 10] LR모델 보완 후 98MHz 산점도



[그림 11] LR모델 보완 후 98MHz 히스토그램

[표 2] LR 모델 보완 전,후의 실측값 비교

실측값 (dBm)	LR모델 보완 전		LR모델 보완 후	
	모델값 (dBm)	오차 (dB)	모델값 (dBm)	오차 (dB)
-55.35	-70.39	15.04	-51.45	3.9
-54.9	-71.92	17.02	-57.59	2.69
-53.1	-70.19	17.09	-51.57	1.53

고리즘과는 달리 실측과 비슷한 정규분포를 이루고 있음을 알 수 있다.

표 2는 실측값 대비 LR모델 보완 전,후의 값 중에서 가장 큰 오차를 보였던 -50~-55dBm근처의 값의 일례를 보인 것이며, 표 3은 고도보정에 의한 점대점

[표 3] LR 모델 수정후의 실측과의 오차

주파수	실측과의 차
27MHz	5.73dB
98MHz	8.33dB

모드의 적용, Correction factor보완, 정확한 안테나 파라미터적용을 통한 LR모델 보완 값과 실측값과의 주파수별 평균 오차로써 모델 보완 후 오차가 줄어듬을 알 수 있다.

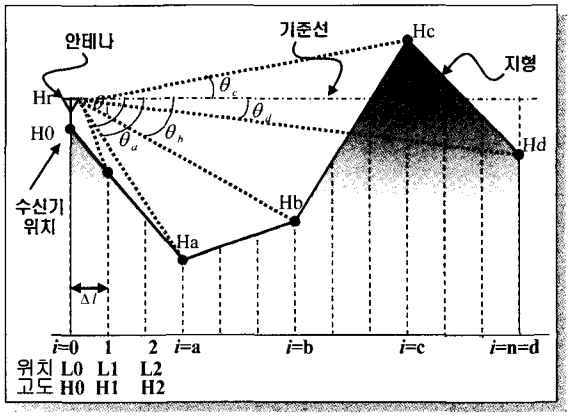
다. 방탐가능영역분석

방탐가능영역분석은 가시선 판단 및 전파환경분석 결과를 토대로 수신기를 기준으로 전방위 또는 사용자가 지정한 영역에 대하여 방탐가능여부 판단 및 방탐가능지역에 대해서는 전파모델을 통한 수신레벨을 도시한다. 즉, 해당 주파수대역에 대한 방탐기의 방탐능력은 가시선이 확보된 지역에 대하여 효과적으로 임무수행이 가능하므로 그림 1, 그림 12 및 그림 13과 같이 가시선 판단 알고리즘을 수행하여 가시선이 확보된 경우에만 경로손실에 대한 수신전력을 2장에서의 보완된 LR모델을 이용해 전파환경분석 결과를 전자지도 위에 도시하고 가시선이 확보되지 않은 경우에는 LR모델 결과를 해당영역에 적용하지 않는다.

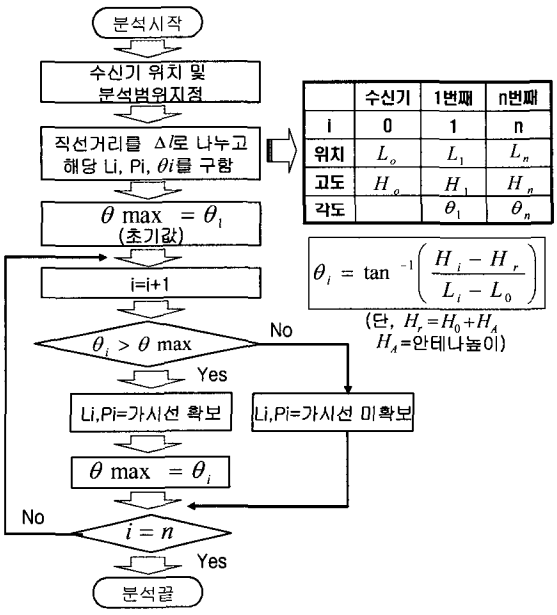
1) 가시선판단 알고리즘

가시선 여부는 수신위치에서 해당지역에 대해 가시선이 확보되는지 판단하는 알고리즘으로 그림 12에서처럼 '0'의 위치가 수신기가 위치하고 'n'위치까지가 분석범위일 경우 지형데이터에서 추출한 i=0~n의 위치와 고도데이터($H_0 \sim H_n$)를 이용하여 $\theta_1 \sim \theta_n$를 구한다. i를 증가시킴에 따라 구한 θ_i값 중 가장 큰 값이 나올경우 $\theta_{\max}$를 갱신시키면서 이후 $\theta_{\max}$보다 계속해서 큰값이 나오면 가시선이 확보했다고 판단하고 작은 값이 나올경우 가시선이 확보되지 않았다고 판단한다. 그림 12의 경우 각각 0<i<c가 되는 지점에 대하여 $\theta_c > \theta_{1<i<c}$이므로 가시선이 확보된 경우이며 c<i<d지점에 대해서는 $\theta_{3<i<4} < \theta_3$이므로 가시선이 확보가 되지 않는다고 판단한다.

그림 14는 전파환경분석결과 및 가시선분석결과를

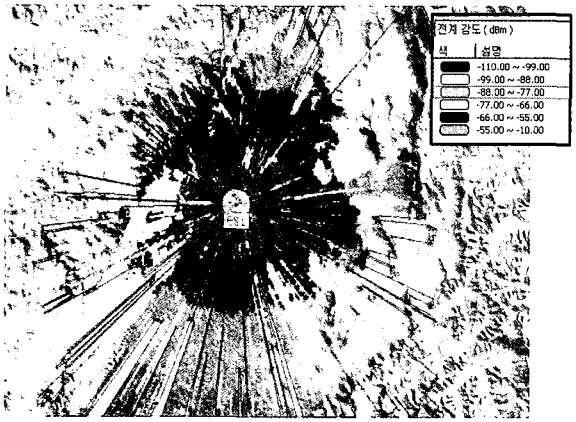


[그림 12] 가시선 판단을 위한 θ값 산출



[그림 13] 가시선 판단 알고리즘

토대로 출력원(97MHz, 출력 5W)에 대한 수신기의 전방향 방탐가능영역분석을 수행한 시뮬레이션 결과이다. 즉, 가운데 위치한 방탐기(ES1)에서 전방향(360도)의 영역(최대 가로×세로=30km × 30km)에 관하여 방탐이 방탐이 가능하지 않는 곳은 색깔을 표시하지 않고, 가능한 영역에 대해서만 수신레벨에 따라 색깔로 구분하여 나타낸 것으로 수신레벨이 높은 곳일 수록 가시선이 확보된 곳일 수록 방탐이 잘된다는 것을 나타낸 것이다.



[그림 14] 전방위 방탐가능영역 분석결과

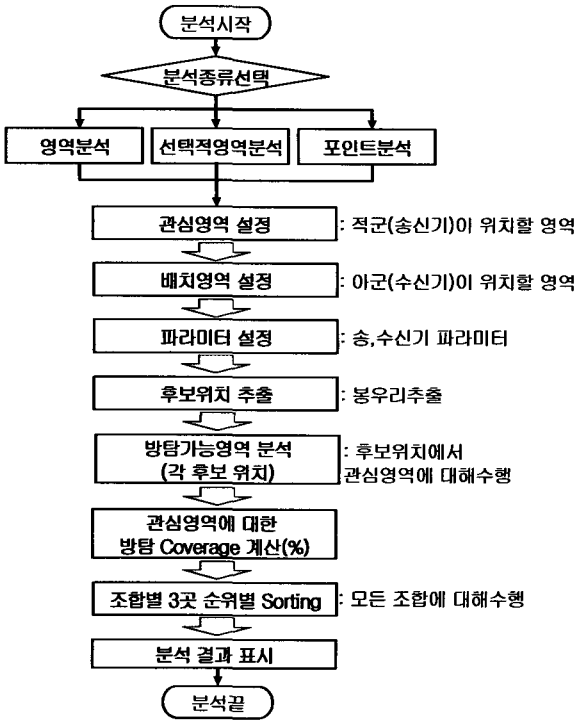
4. 방탐기 최적배치 선정

방탐기에 대한 최적배치는 최적사이트 분석을 통해 수행된다. 이는 방사신호원(송신기)의 특성(신호세기, 주파수, 위치)에 대해 사용자가 지정한 아군 방탐기가 위치할 영역(또는 좌표)에 대해 가장 효과적인 방탐이 이루어 질 수 있는 위치를 선별해 준다. 그 결과는 최대 후보 지역 10개에 대하여 3개씩의 조합에 의한 방탐가능영역의 비율을 산출하여 우선 순위별로 출력해준다. 그 흐름도는 그림 15와 같다.

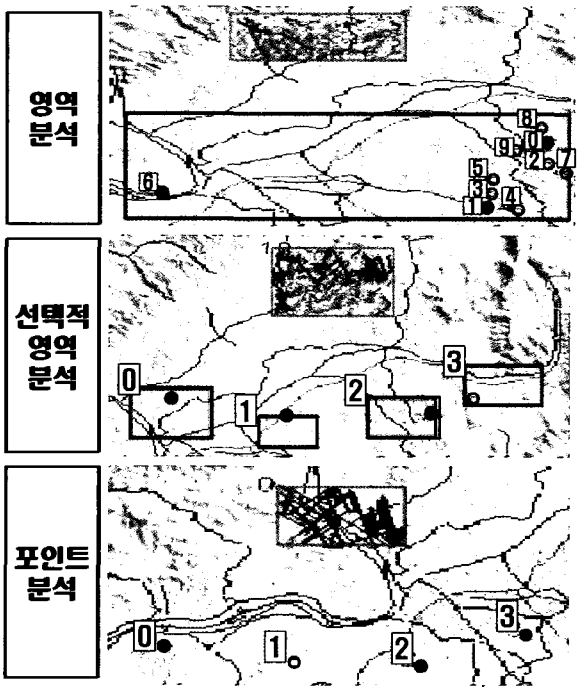
가. 분석종류 선택

분석종류의 구분은 아군 방탐기가 위치할 대상지역을 입력하는 방식에 따라 그림 16과 같이 3가지로 구분된다.

- 영역분석 : 대상지역을 사용자가 영역으로 1개를 설정하고 그 영역내에서 가능한 후보지 최대 10개를 선정하는 방식
- 선택적영역분석 : 대상지역을 사용자가 복수개(최대 10개)로 설정하고 각 영역에 대해 최대 가능한 후보지를 각각 1개씩 선정하는 방식
- 포인트분석 : 대상지역을 사용자가 영역이 아닌 좌표(최대 10개)로 입력하고 그 좌표가 바로 후보지가 되는 방식 즉, 사용자가 후보지를 좌표로 직접 입력하는 방식



[그림 15] 최적사이트 분석 흐름도



[그림 16] 모드별 최적사이트 분석

나. 관심영역 및 배치영역 설정

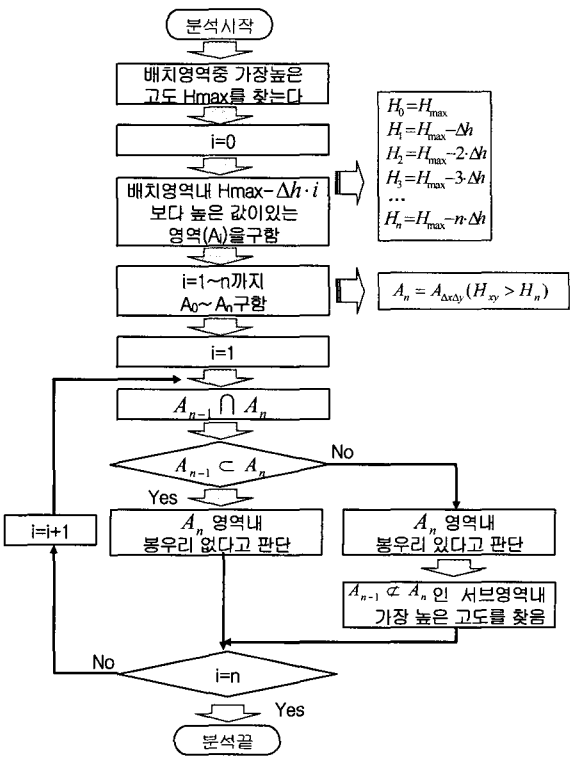
관심영역은 분석을 수행하고자 하는 영역 즉, 송신기가 위치할만한 영역을 지정하는 것이고, 배치영역은 수신기 즉, 방탐기가 위치하고자하는 영역을 지정하는 것이다. 배치영역은 분석 종류에 따라 영역이나 좌표(포인트)로 입력이 가능하다.

다. 파라미터 설정

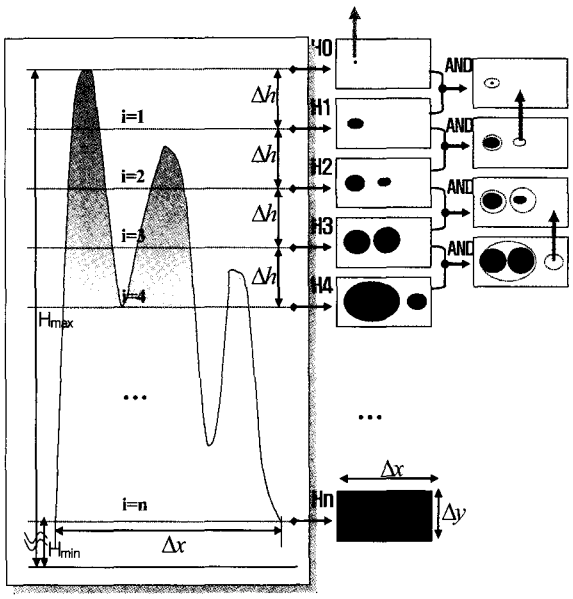
송신기 및 방탐기에 대한 속성을 입력을 입력한다. 방탐기는 안테나높이, 이득, 편파종류를 설정하고, 송신기는 안테나높이, 주파수, 출력, 편파종류를 설정한다.

라. 후보위치 추출

영역분석(또는 선택적영역분석)의 경우에 방탐기가 위치할 곳이 무수히 많이 존재하게 된다. 이 모든 경우에 대해 방탐가능영역을 분석하게 된다면 많은 시간 소요되며 가시선이 확보되지 않은 곳에까지 수행



[그림 17] 봉우리 추출 알고리즘



[그림 18] 봉우리 추출 알고리즘 적용 일례

하게되므로 비효율적이다. 방탐은 일반적으로 고도가 높은 곳에서 가시선이 확보가 되는 곳에서의 효율이 높기 때문에 배치 영역 중에서 고도가 높은 봉우리를 우선적인 후보위치로 선정한다. 아군이 배치될 후보위치 추출은 그림 17 및 그림 18과 같은 봉우리 추출 알고리즘을 수행하여 해당 영역에서 최대 10개까지의 후보위치를 추출한다.

1) 봉우리추출 알고리즘

방탐기가 배치될 영역($A_{\Delta x \Delta y}$)에 대하여 가장 높은 고도(Hmax)를 찾은 후에 Δh만큼 고도를 내려가면서 해당고도($H_0 \sim H_n$)보다 높은 고도가 있는 영역을 찾아서 저장($A_0 \sim A_n$)해둔다. 그 후 해당 높이에 따라 설정내용을 비교하면서(A_{n-1}과A_n) 포함관계가 성립하면 이전 단계에 높은 봉우리가 있었다는 것을 의미하므로 다음 단계로 넘어가고, 포함관계가 성립하지 않으면 새로운 고도가 발생한 것이므로 이 영역내에 가장 높은 고도를 찾아 봉우리로 설정한다.

마. 방탐가능영역분석

해당 후보지(최대 10곳)를 기준으로 관심영역에 대하여 3장의 방탐가능영역을 분석한다.

바. 관심영역에 대한 방탐 Coverage계산

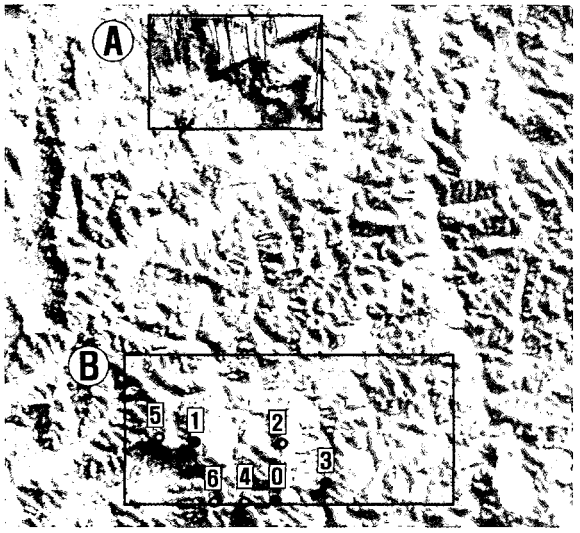
방탐기가 위치할 후보지에서 관심영역에 대한 방탐 Coverage를 해당 영역 대비 방탐가능 수신레벨이 존재하는 곳에 대해 % 대비로 나타낸다.

사. Coverage에 대한 순위별 분류

해당 후보지(최대 10곳) 중에서 3개씩 고른 모든 조합에 대해 커버하는 영역을 비트 프로세싱(OR 연산)을 수행하여 우선 순위별로 분류하여 나타낸다.

아. 분석결과표시

관심영역 'A'에 대하여 배치영역 'B'를 설정하여 최적사이트 영역분석을 수행한 결과를 전자 지도위에 표시해 주며 그 일례로 그림 19에 대한 결과는 표 4와 같다.



[그림 19] 최적사이트 영역분석 결과

[표 4] 후보 사이트별 우선순위 산출결과

순위	최적사이트 ID	Coverage 영역(%)
1	0 1 3	44.93
2	0 1 5	44.65
3	0 1 2	44.14
4	0 3 5	44.04
5	0 1 4	43.72
6	0 1 6	43.60
7	0 4 5	43.28

순위	ID	Coverage 영역(%)
1	0	38
2	1	32
3	2	30
4	4	25
5	3	23
6	5	23
7	6	13

5. 결 론

본 논문은 ES 방탐기 특성을 이용하여 관심 영역의 출력원 정보(신호 세기, 주파수, 위치)에 대해 가장 효과적으로 방탐을 수행할 수 있는 최적 사이트 도출 및 배치에 관한 내용이다. 방탐기가 가지는 장비의 특성 및 지형정보에 의하여 최적사이트를 산출하기 위해서는 봉우리 추출 알고리즘, 가시선분석 및 전파환경분석을 실시하고 그 결과를 3차원 전자지도 위에 도시하였다. 봉우리추출 알고리즘은 배치영역의 고도정보를 이용하여 방탐가능한 봉우리를 선정하고, 가시선분석은 송·수신 사이 지형의 고도차에 의하여 발생하는 가시선 여부를 분석하게 되며 이때, 경로에 따른 전파경로 손실량(path loss)을 계산하여 방탐기의 특성(안테나 높이, 이득, 편파, 주파수, 좌표)에 따라 전파가 전계되는 영역을 분석하고 그 결과를 등위선 형태로 표시해 준다. 이때의 전파환경분석은 LR (Longley-Rice)전파모델을 이용하여 초기 알고리즘을 수행하였으며 해당지역에 대한 실측을 통해 보완을 수행하였다. 또한, 방탐기의 배치 형태에 따라서 영역분석, 선택적 영역분석, 포인트 분석을 수행하여 사용자가 지정한 관심영역에 대하여 방탐가능한 최적사이트를 우선순위별로 나열할 수 있으며 그 결과는 위치탐지로의 응용이 가능하다.

본 시스템을 활용하여 방탐기에 대한 배치전 해당 지역에 대한 사전 분석을 수행함으로써 군의 야전 운용 효율성을 높일 수 있을 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

[1] Richard A. Poisel, "Introduction to Communication Electronic Warfare Systems", Artech House, 2002.

[2] Herndon H. Jenkins, "Small-Aperture Radio

Direction-finding", Artech House, 1991.
[3] 정백호 외, "전파예측모델을 이용한 전계강도분석", 연구보고서, 호서대학교 전파광파연구소, 2004. 9.
[4] 이기섭 외, "차량용 오디오/AV 수신기의 방송 수신 전파환경 측정, 분석과 재현 프로그램 개발", 한국전자파학회논문지 제16권 제3호, pp.293~299, 2006. 3
[5] 양종원, 최준호, 권도백 외, "전장환경분석을 위한 LR모델의 파라미터 설정과 보완에 대한 연구", 제9차 통신/전자 학술대회, pp.399~404, 2005. 11.
[6] 양종원, 최준호 외, "Comm. ES M&S 상세설계", TEDC-509-051339, 국방과학연구소, 2005. 12.
[7] 양종원, 최준호, 박철순, "Stansfield와 MSD알고리즘을 이용한 에미터 위치탐지 영역 분석", TEDC-509-051071, 국방과학연구소, 2005. 10.
[8] 양종원, 박철순, 장원, "센서 특성 및 배치를 고려한 에미터 위치탐지 영역 분석에 관한 연구", 한국군사과학기술학회 논문지, 제9권 제1호(통권24호), pp.99~108, 2006. 3.