地中レーダ受信信号の統計的分散評価を用いた地下空洞の検出[†]

武 富 喜八郎*・宮 崎 保 光*

Underground Cavity Detection Using Statistical Variance of Subsurface Radar Signal

Kihachiro TAKETOMI* and Yasumitsu MIYAZAKI**

The underground cavity detection within invisible medium analytically using the subsurface radar is extremely difficult because of inhomogeneous property of the surrounding medium. However, when the statistical characteristics of the radar signal is known, the method of the cavity detection is able to construct using the proper signal processing. The cavity detection is made possible by using the statistical variance of radar signal for reasons of it implies the wave scattering degree. So we make easily to evaluate the position of the underground cavity.

In this paper, it is described that the amplitude distribution of the subsurface radar signal obeys to the Weibull distribution and the statistical variance is calculated by Log/CFAR processing.

The suitable choice of data cell size at the sampled radar signal is experimentally considered. Finally, We showed the variance of field test and the relations between the variance and the cavity presence were discussed.

Key Words: signal processing, weibull distribution, subsurface radar, statistical variance, underground cavity detection

1. はじめに

地下約数 m 以下の深さに埋設されたパイプや人工構造物の存在あるいは空洞部を非破壊的に検出する目的で、各種の地中レーダが開発され報告されている^{1),2)}。

対象物が金属のように、周囲媒質と電気的特性が著しく異なる場合の検出は、目標物からの反射強度が大きく、周辺媒質からの反射強度は小さいので、目標物の検出はきわめて容易である。しかし、電気的特性が周囲媒質と似ている対象物については、金属パイプの場合と同じように反射波の振幅の大きさの比較による目標物の検出方法だけでは容易でない。

これを解決するには、地中レーダの受信信号の基本的

性質を調べ、その性質に適応した信号処理法が必要と考えられる。

われわれは先に地中レーダ信号の波形計算法、波形に及ぼす各種パラメータの影響を調べ、ケプストラムを利用する空気層の位置推定法の提案を行った³⁾。ケプストラム法は対象物が比較的均質な媒質や広い反射面を有する多層誘電体に対して、有効な信号処理法である。

一方、複雑な曲面からなる境界面や、媒質中に誘電率の異なる部分が多く含まれる地下構造の空洞検出に対しては、統計的な手法が必要となる。

本論文では、地中レーダ受信信号の統計的性質を調べ、その性質に適応した信号処理による空洞の検出法を述べる。

ここに提案する信号処理法によって、空洞部とクラッタ部に相当するレーダ信号の特性値の比率が改善されて、空洞部の存在を推定するのが容易となることを示す。

2. レーダ受信信号の統計的性質

2.1 理 論

Fig. 1 に示すように、多層誘電体に垂直にモノパルス

[†] 第 30 回計測自動制御学会学術講演会で発表(1991・7)

* 岐阜工業高等専門学校 岐阜県本巣郡真正町

** 豊橋技術科学大学工学部 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

* Gifu National College of Technology, Motosu-gun, Gifu

** Toyohashi University of Technology, Toyohashi
(Received July 13, 1992)

(Revised November 16, 1992)

Fig.1 Rough surface boundaries and inhomogeneous medium

波が入射すると、内部の媒質や境界面で電磁波の反射あるいは散乱がおこる。結果としてレーダに受信される波は、多数の反射経路の異なる反射波の複合干渉したものになる。

1 次元の多層誘電体におけるレーダ受信信号波形の計算法については先に報告し、おもなパラメータの影響を調べた⁴⁾。

ここでは、計算で求めるには困難な反射波形の性質について検討してみる。パルス波が照射され、受信された地中レーダ信号には、目標物からの反射のほかに媒質中の小石や岩などによる不要な反射が含まれている。

一般のパルス型空中レーダにおいて、目標物からの反射のほかに各種クラッタが存在する場合、レーダ受信信号の振幅波高値の累積頻度分布は Weibull 分布に従うことが報告されている^{5),6)}。しかし、モノパルス型地中レーダの受信波形の検討はまだ行われていない。

クラッタは時間的にゆらいでいるある不規則変動の時系列 $x(t)$ とみなされる⁸⁾。地中レーダにおいては、媒質の不均一性によりレーダ受信時刻のわずかの差異をゆらぎの要因とみなし、なおかつ、その確率過程を弱定常とみなして以下に解析する。

Weibull 分布では、レーダに取り込まれる時系列信号 $x(t)$ の振幅波高値の確率密度分布 $Pc(x)$ は

$$Pc(x) = \frac{c}{b} \left(\frac{x}{b} \right)^{c-1} \exp \left(- \frac{x}{b} \right)^c \quad (b > 0, c > 0, x > 0) \quad (1)$$

$$= 0 \quad (\text{その他})$$

のように表わされる。ここに、 b はスケールパラメータ、 c は形状パラメータである。 b の大きさを変化させると、 $Pc(x)$ の分布の拡がりが増減し、形状は変わらない。しかし、 c を変化させると、分布の形状が大幅に変わる。 $c=1$ の場合が指数分布、 $c=2$ の場合がレイリー分布である。

(1) 式に変数変換

$$X = \ln(x), Y = \ln \left[-\ln \left\{ 1 - \int_0^x Pc(x) dx \right\} \right] \quad (2)$$

を施すと

$$Y = c(X - \ln(b)) \quad (3)$$

なる直線の式となり、信号振幅の累積積分を含む Y と振幅分布の対数値 X のプロットは、直線の式で近似でき、これより Weibull 分布のパラメータ b, c を求めることができる。

2.2 受信信号波形の振幅波高値分布検証

まず、実験で得られたレーダ受信信号波形の振幅波高値分布を検証する。実験に用いた地中レーダの送信波形は、周期 6 ns のモノサイクルパルスで、繰返し周期は 20 μ s である。送信パルスの中心周波数は 167 MHz、アンテナの大きさは底辺 46 cm、高さ 40 cm の三角形の板を頂点で 2 枚対向させた抵抗装荷の広帯域ダイポール型である。

パルスは、送受兼用アンテナから放射され、切り換えスイッチにより、利得 55 dB の高周波増幅器と STC (Sensitivity Time Control) 回路を経て、サンプリング回路に送られる。この回路にて約 20 μ s に 1 回の割合でサンプリングされ、低域フィルタを通り、原信号と似た低周波信号に変換される。この結果、受信波は時間軸上で約 2000 倍伸長され、低周波信号におきかえられパソコンに取り込まれる。

実験に用いた模型は、平地に幅 1.3 m、厚さが 2 m ごとに 20, 35, 50 cm と変わる全長 6 m のコンクリート板、その下部は砂充填部、空洞部の構成となっている。空洞部は、土や砂の量によって空気層の長さを変えられる。受信波はコンクリート板上のアンテナを移動させながら、移動距離 2 cm ごとに取り込み記録した。

振幅波高値分布の検証は、取得波形に対して (2) 式の変換による X と Y を計算し、プロットすることにより行った。Fig. 2 は結果の 1 例である。図中の RMSE は、近似した直線と測定値の差を 2 乗し、その平均の平方根を意味する。プロットの結果を見ると 1 本の直線で近似

Fig. 2 Inspection of Weibull distribution for the experiment data

Table 1 Scale parameter b and Shape parameter c

Concrete thickness h_1 [cm]	2-nd medium		scale parameter b	shape parameter c
	medium	h_2 cm		
20	sand	30	0.877	1.124
20	air gap	30	0.880	1.151
35	sand	15	0.858	1.097
35	air gap	15	0.929	1.204
50	Al.plate	0	0.843	1.023
50	concrete	0	0.905	1.107

Values indicate after Log/CFAR processing.
Calculated data are concrete structure model.

(a) At the case, $h_2=0.1$ m, $\epsilon_{r3}=7$, $\tan \delta_3=0.26$ (b) At the case, $h_2=0.4$ m, $\epsilon_{r3}=7$, $\tan \delta_3=0.26$

Fig. 3 Inspection of Weibull plot for the calculated waveform

できるので、単一型 weibull 分布とみなすことができる。

模型の内部状態の設定を変えて同様に検証計算を行うと、プロット点はほぼ直線上にのることがわかった。その結果を Table 1 に示す。これより、コンクリート厚が同じとき、その下部に砂、アルミ板がある場合、 c の値は小さくなっていることがわかる。

一方、空気層を考慮した均質な平行平板誘電体層構造におけるモノパルス波の反射波形に対する X - Y プロットを行ってみると、Fig. 3(a), (b) のようになった。送信波形は、幅 6 nS のモノパルス波で、誘電体モデルの第 2 層の空隙長が異なると b , c の値がわずかに変化する。

Fig. 4 Relation between shape parameter and air gap length

Fig. 2 および Fig. 3 で明らかのように、計算波形の振幅波高値分布も、Weibull 分布を表す直線で近似できることから、実験波形と同様 Weibull 分布に従っているとみなすことができる。パラメータ b , c は、送信波形や内部状態に依存するが、とくに振幅波高値の確率密度分布を変える形状パラメータ c の特性は重要である。

Fig. 4 は、計算でえられた反射波形をもとにコンクリート下の空気層の長さ h_2 と c の関係を示したものである。計算上の波形にはクラッタの存在はなく、反射経路の異なる波の複合干渉効果が折り込まれる。この結果より、空気層上下の境界長 h_2 が、送信波のパルス幅相当長 1.8 m の 10% より狭いと、上の境界で反射された波も下の境界で反射された波もお互いに干渉の度合は小さく、このとき c の値は大きくなる。 h_2 がパルス幅相当長の 10% より広い場合は、反射波形に空気層で反射する干渉効果が加わる。このとき c の値は小さくなる。Table 1 で示したように、実験データにおける c の値は、電磁波の散乱の度合に依存して変わっている。一方空気層を有する多層誘電体でのモノパルス波の反射に対する c の値は、干渉の度合に依存するとみなされる。散乱効果と干渉効果は、 c の値において同じ傾向を示すことから、 c の評価は重要である。

3. Log/CFAR 処理

3.1 理 論

いま、Weibull 分布に従う受信信号を対数増幅器に通して、統計量である分散を計算してみる。対数増幅器の出力信号 y は

$$y = k \cdot \ln(lx) \quad (k, l \text{ は対数増幅器の定数}) \quad (4)$$

となり、 y の平均値 $\langle y \rangle$ は

$$\begin{aligned} \langle y \rangle &= \int_0^\infty k \cdot \ln(lx) Pc(x) dx \\ &= k \cdot \ln(lb) \int_0^\infty \exp(-X) dX \\ &\quad + \frac{k}{C_0} \int_0^\infty \ln X \cdot \exp(-X) dX \end{aligned}$$

$$=k \cdot \ln(lb) \frac{k}{c} \gamma \quad (5)$$

が得られる。ここに γ はオイラーの定数 ($=0.5772 \cdots$) である。また、式の導出途中 $X=(x/b)^c$ なる変数変換を行っている。つぎに、 y の 2 乗平均 $\langle y^2 \rangle$ を求めると

$$\begin{aligned} \langle y^2 \rangle &= \int_0^\infty k^2 \cdot \ln^2(lx) Pc(x) dx \\ &= k^2 \ln^2(lb) \int_0^\infty \exp(-X) dX \\ &\quad + \frac{2k^2}{c} \cdot \ln(lb) \int \ln X \\ &\quad \cdot \exp(-X) dX + \frac{k^2}{c^2} \int_0^\infty \ln^2 X \cdot \exp(-X) dX \\ &= k^2 \ln^2(lb) \frac{2k^2}{c} \ln(lb) \gamma + \frac{k^2}{c^2} \left(\frac{\pi^2}{6} + \gamma^2 \right) \quad (6) \end{aligned}$$

y の分散 $\text{Var}(y)$ は

$$\text{Var}(y) = \langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2 = \frac{k^2}{c^2} \frac{\pi^2}{6} \quad (7)$$

となる。この結果から対数増幅器を通した後の信号 y の分散は、形状パラメータ c のみに依存することがわかる。前に述べたように、実験結果から媒質が空気の場合と砂が充填されている場合では、前者の c は大きく (分散小)、後者の c は小さい (分散大) ことから、画像処理を行うと、空洞が存在する場所では分散の小さな領域が面的に広がるものとみなされる。以上のような考え方で、形状パラメータ c を評価して、画像処理してゆけば分散量に対応する内部状態を表示できる。

一般に、レーダの受信信号強度のクラッタに基づく変動は、その強度の分散を求めることで、クラッタの影響を吸収し、ある域値との比較によって、目標物の存在を判別できる。地下空洞の検出においては、媒質の電気的特性の空間分布の違いに基づく受信信号の変動を同様に分散をもとめることで吸収できる。したがって分散値の特性が、空洞とクラッタの相違となって現れるのに着目して、信号処理を行うのである。

Weibull 分布に従う信号を対数化してその分散を求める計算は Log/CFAR 処理と呼ばれる。Fig. 5 に Log/CFAR の処理手順を示す。

3.2 処理結果

通常の処理は、深さ方向あるいはアンテナ移動方向の 1 方向の小区間のみ対象とする 1 次元 Log/CFAR 処理

Fig. 5 Flow of variance calculation called Log/CFAR processing

が行われるが、深さ方向とアンテナ移動方向の二つの小区間で形成されるセルにおける 2 次元処理が実用上重要である。セル単位の処理は、ランダムなレーダの受信信号の性質が平均化され、レーダ画像におけるスペックル現象を軽減するための処置で⁷⁾、空間分解能はそのため低下するが、画像としてみた場合、スペックルが消えて、画面がみやすくなる利点を有する。

セルの選び方の基準は、受信波形 (生データ) の自己相関長 τ_0 とした。この理由は、受信波形を時間方向 (深さ方向) に移動させ自己相関を調べてみると、相関値は単調に減少し、0 に達した以降はほとんど変化しない。したがって生データの各サンプル点間で、正の相関にあるサンプル点は、統計的性質を保存している区間とみなし、相関関数の最初の 0 までの時間幅を τ_0 としている。

計算では $0.25\tau_0$, $0.5\tau_0$, τ_0 , $2.0\tau_0$ の時間長に相当するデータの個数を対象とした。模型実験では τ_0 に相当するサンプリングされたデータの個数は 11 個であった。

Fig. 6(a) は、内部状態の既知なコンクリート構造物のレーダ受信信号に対して、深さ方向、方位方向に各 11 個のデータセルにおける分散を求め、結果の表示を行ったものである。同図 (b) は、Fig. 6(a) の説明用に分散の大きさのほぼ等しい縞状の領域を記号 A~J で示した。レーダは送受信波を TR スイッチで切り換えているの

(a) Results of variance for known concrete structure model

(b) Explanation figure of same variance group at Fig. 6(a)

Fig. 6 Statistical variance display calculated by Log/CFAR processing

で、スイッチの漏洩のため、同一の受信波形部分が現れる。したがって、この漏洩部を除いた部分の結果について検討してみる。

図中 A, C 部では分散が大きく, B, D 部では分散が小さい。分散の大きい部分は、散乱体(砂)がその空間に充填されており, 小さい部分は空気層に対応している。E 部は横幅が狭いことから厚さの異なるコンクリート側面からの反射を受けているものとみなされる。F 部の横方向に長い応答は、模型底部(地表面)の境界面での散乱を拾ったためとみなされる。G 部は比較的分散が小さく同一であることから、組成の均一な散乱体と思われる。H 部は、コンクリートの側壁と底部に敷かれたアルミ板からの反射があるため、分散が大きいと考えられる。I 部は地表の境界面の多重反射の応答に相当し、J 部の分散は側面からの反射の応答とみなされる。

4. セルの大きさ

分散を計算するとき、対象とする領域の大きさをどの程度に選ぶかは、重要な問題である。

セルの大きさを変えて本処理による画像のみやすさを定量的に評価してみる。

目標物である空洞部における信号の分散と周辺部の媒質の分散比率は

$$\text{分散比率} = 20 \log \frac{\text{周辺部分の分散の平均値}}{\text{空洞部分の分散の平均値}} \text{ dB}$$

として計算した。

Table 2 にセルを構成するデータの数を変えて、分散比率を求めた結果を示す。

表より、データを深さ方向に増やしてゆくと、この比率は飽和状態になることがわかる。セルを方位方向に増やしても、分散比率はほとんど影響されていない。したがってセルの大きさは、実験的に深さ方向に自己相関長

に相当するデータのみを対象とすれば良いといえる。この理由として、パルスレーダの受信波形の自己相関関数は、指数関数的な減少関数であり、自己相関長以降のデータ間には無相関な白色雑音に近い性質を有することから説明できる。

参考までに生データにおける空洞と周辺部の振幅比を求めたら 1.95 dB となった。生データからの両者の識別は困難であるが、Log/CFAR 処理の結果、格段に改善されたといえる。

5. 実地試験結果

校内にて地下構造の異なる箇所で地中レーダを移動させて反射波形を取り込み、Log/CFAR 処理により分散を求めた。Fig. 7 は歩道用として厚さ 5 cm, 大きさ 30×30 cm のコンクリート板、その下部は砂を 3 cm と砂利 5 cm の厚さに敷いてある箇所での規格化分散である。処理結果をみると、図から明らかに分散値の小さな領域があり(図中の丸印)、その周辺部では分散値が大きい。丸印の箇所は空洞部か均質の低損失誘電体と推察される。同所と周辺の分散比を求めたら Table 3 のようになり、自己相関長相当のデータ 11 点以上のセルで分散比率が改善されていることがわかる。参考までに同箇所での生データの振幅比較の比率では、3.0 dB であった。

Fig. 8 はコンクリート厚さ 8 cm 下に碎石 10 cm 厚の簡易舗装道路を走査してえた分散結果である。走査方向に 3 m の位置で、地表より深さ 28 cm に直径 15 cm の排水管が道路と直角に埋設しており、その箇所(図中の丸印)での分散は小さく、その周囲の分散は大きいことがわかる。ほかにも分散の小さな箇所が同じ深さの位置に存在しているが、これらは今のところ不明である。図より 50 cm 以上の深さに現れている応答は多重応答とみなされる。Fig. 6 のコンクリート構造模型に対するデータの処理結果と比較して、実地試験では多数の応答が存在す

Table 2 Variance ratio of target versus clutter [dB]

depth direction	Log/CFAR		scan direction	
	Size of cell		5 wave	11 wave
	5 point		14.0	13.6
	11 point		34.5	33.6
	23 point		30.8	29.1

Table 3 Variance ratio of target versus clutter (dB)

depth direction	Log/CFAR		scan direction	
	Size of cell		5 wave	11 wave
	5 point		14.3	17.3
	11 point		23.2	24.8
	23 point		28.6	26.6

Calculated data are results of field test at Fig.7.

Fig. 7 Exaple of field test (Enclosed area shows cavity or low loss dielectric material)

Fig. 8 Example of field test (Enclosed area shows a drain pipe of 15 cm in diameter)

る。これは過去に実施された工事において、排水管を埋設した後、埋め戻しが行われたと考えられる。

6. 結 言

一般の空中レーダの信号処理としては、Log/CFAR 処理の有用性が報告されているが、本論文では、統計的分散の導入により、空洞のような周囲媒質と比べて電気的特性に近い目標物の存在を地中レーダで調べるのに有用であることを示した。

分散の計算には Log/CFAR 処理法のセルを用いて行われ、そのとき、問題となるセルの大きさは、深さ方向に自己相関長程度に選び、横方向のデータの個数にはとくに影響されないことを示した。

模型実験データの分散と地下構造の関係を考察し、実地試験での処理結果について地下構造との関連を説明した。

今後の課題として、処理時間の短縮をはかりリアルタイムに処理結果を識別できるシステムの開発が残されている。

参 考 文 献

- 1) 長山, 松浦, 上窪, 東内: 地下埋設物探査レーダシステム, 地下電磁計測ワークショップ論文集, 36/38 (1989)
- 2) 松浦, 菊田: 地中探査レーダ, 地下電磁計測ワークショップ論文集, 45/49 (1989)
- 3) K. Taketomi and Y. Miyazaki: Investigation on Reflection Waveform of Subsurface Radar and Its Statistical Properties. Proc. of 1989 ISNCR, U-3, 693/698 (1989)
- 4) K. Taketomi and Y. Miyazaki: Reflection Characteristics of Monocycle Pulse Measurement on Dielectric Layers Structure, International Symp. on EMC, 8, 3/7, 1, 334/337 (1989)
- 5) 岩間, 関根, 武者: X-バンドレーダによるグラウンドクラッタの抑圧, 信学論, J69-B-3, 3, 256/264 (1986)
- 6) 小川, 関根, 武者: X-バンド・レーダによる流水クラッタの抑圧とターゲットの検出, 信学論, J72-B-II, 4, 171/178 (1989)
- 7) 奥島, 大槻, 馬場: 不均質媒体からのエコーの統計的性質, 信学技報, US84-38, 9/14 (1984)
- 8) 関根松夫: レーダ信号処理技術, 電子情報通信学会, 100 (1991)

[著 者 紹 介]

武 富 喜八郎 (正会員)

1964 年, 名古屋工業大学電気工学科卒業, 同年岐阜工業高等専門学校助手, 同助教授を経て, 88 年教授, 現在に至る。マイクロ波誘電率測定法, 電磁波応用計測の研究に従事。

宮 崎 保 光

1963 年, 名古屋大学工学部卒業, 68 年同大学大学院博士課程修了 (工学博士)。69~71 年ドイツ連邦共和国ブラウンシュバイク工科大学高周波工学研究所客員, 76 年名古屋大学工学部電気工学科助教授, 81 年豊橋技術科学大学情報工学系教授, 現在に至る。電磁界理論, 光ファイバ, 光集積回路, 環境電磁工学, 生体電磁工学の研究に従事。