

探地雷达的研究与试验

王笑京

(交通部公路科学研究所 北京 100088)

提要 探地雷达是一种新型的非破损探测设备,本文简要地介绍了这种雷达的探测原理;详细地讨论了道路工程检测中的探地雷达响应、电磁波在地层中的传播特性、地下目标的输出模型以及探地雷达重要技术指标的选择;最后介绍了 IR-1 型探地雷达样机的部分试验结果。

关键词 雷达 探地雷达 冲击雷达 非破损检测 电磁学

The Research and Test of The Ground-penetrating Radar

Wang Xiaojing

(Research Institute of Highway ,the Ministry of Communications ,Beijing)

Abstract The ground-penetrating radar (GPR) is a kind of nondestructive detection equipment. By briefly reviewing the principle of the GPR, the responses of the GPR used in road pavement detection, the output model of the subsurface object, and the selection of the GPR parameters are discussed in the paper. Finally, some testing results of the IR-1 GPR are presented.

Key Word Radar Ground-penetrating radar Impulsive radar
Nondestructive tests Electromagnetics

1 概述

道路的研究、施工、养护经常需要了解路面以下或地下的层次结构及埋设物,目前采用的方法有:查阅竣工图、钻探取样等。然而钻探取样不仅点数有限,而且效率也很低,特别是对地下埋设物及空洞很难用钻探的方法去探测。

无载波探地雷达(也称为冲击雷达)首先是由 J. C. COOK 在 1960 年首先提出^[1],此后曾发表了不少有关无载波探地雷达的论文。约在 70 年代初,开始有冲击雷达实验的报道,1980 年 7 月在美国马里兰州巴尔的摩 IEEE 电磁兼容性国际会议上,演示了美国地球物理公司生产的一种雷达,此时已达到了商业应用的水平。目前国外这种雷达所能达到的水平是在干燥的土层中能穿透十几米,在冰层中可穿透 30 m,其探测的内容主要是地下管道(包括金属和非金属)。探地雷达的研究与试验——王笑京

属)、地下空洞、地下结构物、地下层次结构和冰层厚度。

国外从 80 年代开始就试图将这种雷达用于道路、桥梁的检测^{[2]、[3]、[4]、[5]},我们从 1988 年开始进行用于路面路基探测的探地雷达的研究。根据路面及路基探测对探地雷达的要求,提出了其主要的技术指标和具体实现方案,研制出了探地雷达样机。利用此样机进行了各种环境条件下的实测试验和分析。本文主要介绍探地雷达的探测原理、技术性能及部分试验结果。

2 探地雷达的基本原理

探地雷达探测地下物体是利用电磁波遇到介电常数不连续界面会产生反射的原理,如图 1 所示,在介电常数为 ϵ_1 的介质中的天线,发射的电磁波 P_0 。在遇到介质 1 与介质 2 的界面时($\epsilon_2 \neq \epsilon_1$),分为两部分,其中 P_0' 将继续沿原来的方向传播,而 P_1 将反射回来。当地下有多层介质或存在空洞和某种物体时,在每个不连续的界面上都将产生反射,因此只要能检测出反射波的存在并准确地测定各反射波相对于发射波的时间差,就可以测出地下层次结构和地下物体或空洞。

界面处反射波的功率 P_i ($i=1, 2, \dots$) 和相位,除了与发射功率 P_0 有关外,还与界面上下方介质的介电常数有关。以界面 1 为例,反射波的能量与相位由下式确定:

$$\rho = \frac{A_r}{A_0} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

式中: ρ 为界面处的反射系数; A_0 为入射幅度; A_r 为反射幅度; ϵ_1, ϵ_2 分别为界面上下方的介电常数。

根据电磁波的传播理论,电磁波在介质中的传播速度为:

$$u = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

式中: C 为真空中电磁波的传播速度, ϵ_r 为介质的相对介电常数。地层中电磁波的波速与该地层的相对介电常数的平方根成反比。常见介质的相对介电常数见表 1。由此可以看出,各种介质介电常数的差别较大,因此要精确地测定地下或路面各层的厚度以及地下物体的深度,必须确切地知道所测介质的介电常数。

另外,当电磁波在介质中传播时,其能量的衰减量 A (dB/m) 由下式确定^[3]:

$$A = 12.863 \times 10^{-8} f \sqrt{\epsilon_r} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中:

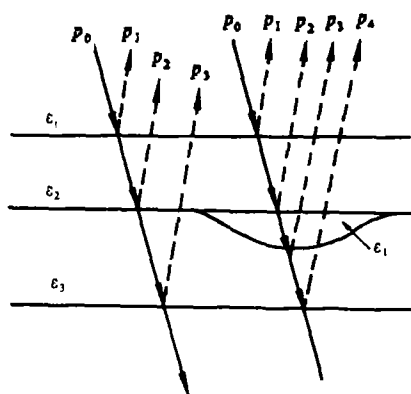


图 1

常见介质相对介电常数 表 1

介质	相对介电常数 ϵ_r
空气	1
干净水	81
海水	81~88
冰(干净水)	4
冰(海水)	4~8
沙(干燥的)	4~6
沙(潮湿的)	30
一般土	12
混凝土	6~12
石灰石	7~9
白云石	6~8

注:引自参考文献[3][4][6][7]。

$$\tan\delta=1.80\times10^{10}\frac{\sigma}{f\epsilon_r}$$

是介质损耗角的正切值; f 为电磁波频率(Hz); σ 为电导率(S/m)。

在某些介质中,不同频率的电磁波的衰减量见表 2^[6]。由于电磁波在介质中传播的速度很快(在混凝土中波速约为 1.13×10^8 m/s),当混凝土层厚度为 10 cm 时,在该层两个界面处的反射波的时间差为 0.882 ns,要想将如此之小的时间间隔判断出来,就必须使发射电磁波的持续时间小于或接近于这一量级,因此国际上用于地下探测的探地雷达的发射脉冲宽度多为 1 ns 左右,也就是说,其工作带宽约为 1 GHz。这种雷达的探测示意图如图 2 所示。图中所示发射脉冲为泄漏到接收机内的发射脉冲,它正好可作为时间起点的标志。将此波形显示在示波器上,现场就可以根据回波判断地下的结构。另外,测试时雷达沿某一方向移动,可用记录仪将波形记录下来,送入计算机处理,便可得到被测地段在测试方向上的垂直剖面电磁回波图形。

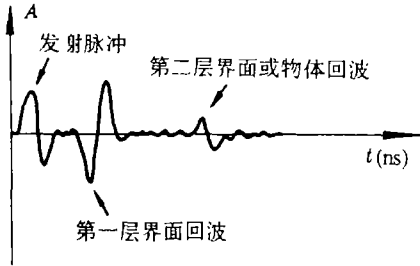


图 2

几种介质中电磁波的衰减量 (单位:dB/m) 表 2

材料	频率 (MHz)			
	1	10	100	500
纯水	0.025	0.039	0.408	16.191
沙土(潮湿的)	0.471	0.513	0.773	4.047
粘土(干燥的)	0.013	0.075	0.425	1.649
粘土(潮湿的)	0.780	3.803	17.93	53.75
海水	34.50	108.54	326.54	592.03
花岗岩(干燥的)	0.732×10^{-5}	0.732×10^{-5}	0.732×10^{-5}	0.732×10^{-5}

3 探地雷达用于路面及路基探测时的性能

探地雷达是一种无载波雷达,因此也有人称它为基带雷达,它向目标或地下发射的是具有一定周期且持续时间极短的脉冲。为了提高距离分辨力,目前发射脉冲的持续时间一般是在零点几至几个纳秒(ns)之间,因此这种雷达信号所占的带宽一般为几百至几千兆赫,这与传统的雷达相比有极大区别。

3.1 探地雷达系统的响应

当雷达向一个目标发射信号时,其接收到的目标反射信号称为回波。冲击雷达测试时发射信号为冲击函数 $\delta(t)$,则回波频谱 $V_o(\omega)$ 为^{[8][9]}

$$V_o(\omega)=O(\omega)S(\omega) \tag{4}$$

其中: $O(\omega)$ 为目标冲击响应的频谱, $S(\omega)$ 为雷达系统(包括天线)的传递函数。具体目标的冲击响应频谱 $O(\omega)$ 应是确定的,据此我们可以研究雷达系统的特性,反过来,当雷达系统确定时,即冲击响应 $S(t)$ 已知时, $V_o(t)$ 由下面的卷积式确定。

$$\Gamma_0(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} O(\tau) S(t-\tau) d\tau \quad (5)$$

通过测量 $S(t)$ 和 $\Gamma_0(t)$, 就可以利用反卷积得到目标的冲击响应 $O(t)$, 从而可得到目标的各种特征或进行目标识别。

3.2 探地雷达的分辨力

如图 3 所示, 一物体受到频率为 f 的电磁波照射时, 该物体在空间产生的绕射场为 $V(\theta)$, 当照射频率变成 $2f$ 时, 由于空间展宽的效果, 在固定位置 θ 的接收机收到的绕射场为 $V(2\theta)$, 即好象接收机移到 2θ 去一样。如果频率变化范围是 $f_{\min} \sim f_{\max}$, 则等效天线位置从 D 移到 $(f_{\max}/f_{\min})D$, 由此得到天线等效口径为

$$A_c = \frac{D f_{\max}}{f_{\min}} - D \quad (6)$$

或

$$A_c = \frac{DB}{f_{\min}} \quad (7)$$

式中, $B = f_{\max} - f_{\min}$, 即带宽。由上式可知, 在天线偏离垂直线的距离 D 为一定时, 天线的等效口径与带宽成正比, 与频率下限成反比, 因此要提高雷达的分辨力, 可以从加大雷达带宽和降低雷达频率下限入手。

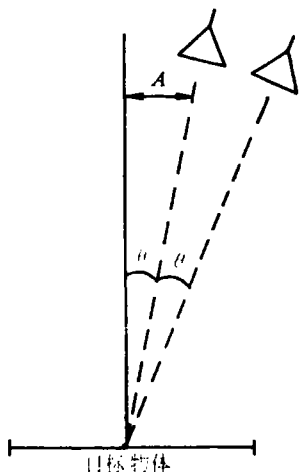


图 3

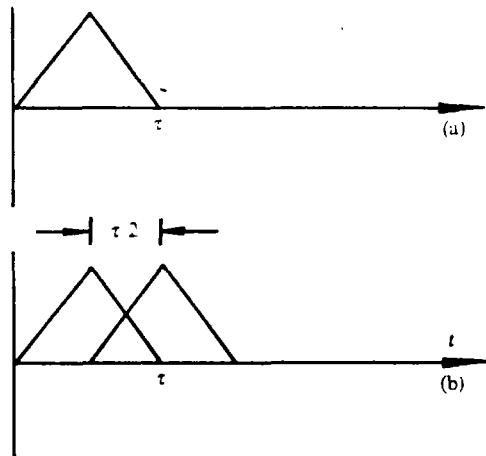


图 4

为分析方便, 假设发射与接收信号均为三角脉冲。如图 4(a) 所示, 该信号的时宽 τ 与带宽 B 的积为

$$\tau B = 1 \quad (8)$$

由图 4(b), 设两个三角形脉冲最小可分辨的时间间隔为 $\tau/2$, 即要求

$$\Delta t \geq \tau/2 \quad (9)$$

时才可分辨出两个目标。由 (8)、(9) 式有

$$\Delta t \geq 1/(2B) \quad (10)$$

由 (2) 式, 当被测介质中电磁波速度为 u , 照射角为 θ 时 (如图 5 所示), 有以下关系

$$\Delta t = a \sin \theta / u \quad (11)$$

由(10)、(11)式有

$$\frac{a_r B \sin \theta}{u} = \frac{1}{2} \quad (12)$$

由式(12)可以看出,在探地雷达中,最小可分辨目标的尺寸仅与系统带宽 B 及偏置角 θ 成反比,而与收发天线的孔径大小及目标天线间的距离无关。

当用于地层探测时, $\theta = 90^\circ$, 则(12)式变成

$$\frac{a_r B}{u} = \frac{1}{2} \quad (13)$$

设地下电磁波传播速度为光速的 $1/3$, 在双程的条件下有:

$$\frac{\frac{a_r}{2} B}{\frac{c}{3}} = \frac{1}{2}$$

即

$$a_r = \frac{c}{3B}$$

当系统带宽为 1 GHz 时, $B = 1 \times 10^9 \text{ Hz}$, 故有 $a = 0.1 \text{ m}$ 。在以上的分析中,需注意带宽 B 是整个系统的带宽,即 3.1 中 $S(\omega)$ 的带宽,因此在研究此雷达的分辨力时,不仅要考虑信号源的带宽,还必须把系统的整个带宽考虑在内。

3.3 用于路面探测时的反射率及衰减量

如前所述,探地雷达是利用不同物质介电常数的差异来探测地下目标的,但对具体的地下探测来说,情况要复杂得多,也就是说 3.1 中的 $O(\omega)$ 包含了地面及地面以下全部回波。若要地下某种特性进行测试,则需将 $O(\omega)$ 进一步分解,才能得到有用的数据。从时域的角度看,最容易提取的是反射信号,即回波中的时间差。对一部具体的雷达来说,除了前节所讨论的分辨力以外,能否探测到某一层次或某一物体,取决于回波的强度。回波的强度是由被测物体的反射系数 ρ 和物体在地面以下的深度决定的。电磁波在地下的衰减量由(3)式确定,本节重点讨论反射系数。

由于 ρ 直接取决于两介质的相对介电常数,因此在不同的地质条件下,雷达所能测到的层次和物体以及其最大探测深度均有差异。例如:当地面或路面是混凝土时,由表 1 知其相对介电常数在 $6 \sim 12$ 之间,取平均数为 9,则由式(1)可得在空气中向地面照射时 ρ 为 0.5,由此可知有 50% 的功率反射回来,由表 1 还可知砂的介电常数与其含水量有关,一般在 $4 \sim 30$ 之间,因此混凝土层以下的地层若为砂质,则当砂的介电常数落在 $6 \sim 12$ 之内时,便很难分辨出层次结构;若是在混凝土层以下有空洞,其反射是很强烈的,因此可以很容易探测出来。

由此可知,探地雷达探测路面层次及地下目标的效果,很大程度上取决于地下物质介电常数的差异。

3.4 探地雷达主要技术指标的确定

根据以上的分析以及公路测试的需要,并结合国内外元器件质量及工艺水平,确定探地雷达的几项主要技术指标。

根据对分辨力的分析可知,要分辨力达到 0.1 m ,雷达系统带宽应达到 1 GHz ;要使分辨力达到 0.5 m ,雷达系统带宽应达到 2 GHz 。根据雷达响应的分析,发射信号的带宽必须不小于雷达系统的带宽。假设发射脉冲信号为三角脉冲,则由式(8)可知,以上两种分辨力条件下的探地雷达的研究与试验——王笑京

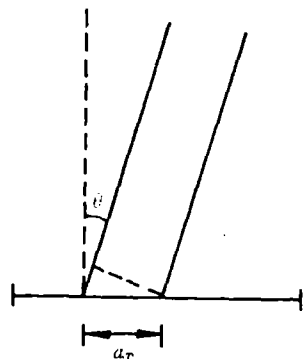


图 5

发射脉冲底宽分别为 1 ns 和 0.5 ns,也就是说,脉冲的前沿或后沿分别为 0.5 ns 和 0.25 ns。根据国内元器件及测试设备的情况,我们选择发射脉冲的底宽在 0.8~1.5 ns 之间。

由前面的讨论可知,要能分辨出 10 cm 或更小的层次或物体,时间测量分辨力必须优于 $\frac{1}{3}$ ns,而且整个雷达系统的带宽也应达到 1 GHz 以上。为达到此项指标,只能采用取样技术,根据取样技术的要求及国内现有器件的指标,雷达发射脉冲的周期必须小于 100 KHz。

3.5 探地雷达探测目标的输出模型

探地雷达工作时的示意图见图 6(a),雷达沿地面以匀速 v 移动,以 μs 或 ms 为数量级的时间间隔向地下发射持续时间约为 1 ns 的脉冲。设在深度 D 处有一垂直于纸面的管道或一物体,若雷达与目标的水平距离为 h ,那么雷达与目标的距离 $d = \sqrt{(D^2 + h^2)}$,设雷达天线波束角为 2β 则在雷达输出的图形上能看到一条水平长度为 $2D \tan \beta$ 的双曲线型图形,如图 6(b)所示。由此可知,目标深度越深,在雷达输出图形上所显示的水平长度就越长,如果目标离地面很近,则有可能仅看到一个点,而看不到双曲线。利用探地雷达探测地下空洞时的结果证实了这一点^[6]。

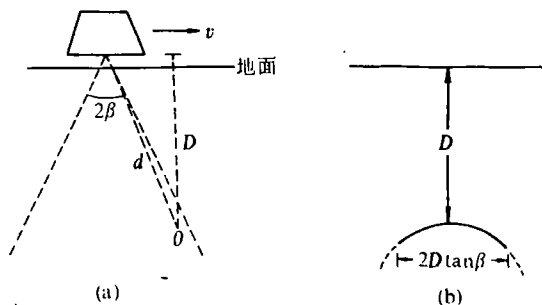


图 6

4 探测试验

4.1 地下目标的探测

为得到不同介质界面雷达的探测性能和探测地下目标的数据,进行了以下试验:

4.1.1 试验 1

在圆明园北侧修筑了一小段水泥路,在路面下埋设了各种目标,利用雷达对地下目标进行了探测。该段路的结构见图 7,利用雷达探测的结果见图 8。

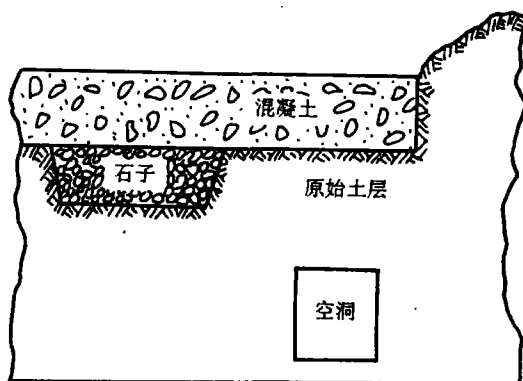


图 7

4.1.2 试验 2(砂坑试验)

如图 9 所示,在一砂坑内将 B 内的沙子挖松(体积为 $100 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$),在挖松的 B 内人为地造一个直径 30 cm,深 25 cm 的空洞,该空洞上界面距沙坑表面 27 cm,空洞周围及上面仍用砂充实,用雷达沿路线 CD 测量,测量结果见图 10。为了对比,将 B 内全部充满砂子,再用雷达沿路线 CD 测量,测量结果见图 11。

由图 10 和图 11 可以看出:①挖松的沙子与未挖松的部分雷达可清楚地分辨出来,这是由于沙子的密度不同,介电常数也就不同(沙粒间含空气的量不同),因此雷达易于辨认;②空气界面的反射是很清楚的,这是因为空气与固体的介电常数相差悬殊,故反射强烈;③由于空洞上界面距沙坑表面很近,空洞的回波对沙坑表面的回波是有影响的,但仍可辨别出表面回波的位置。

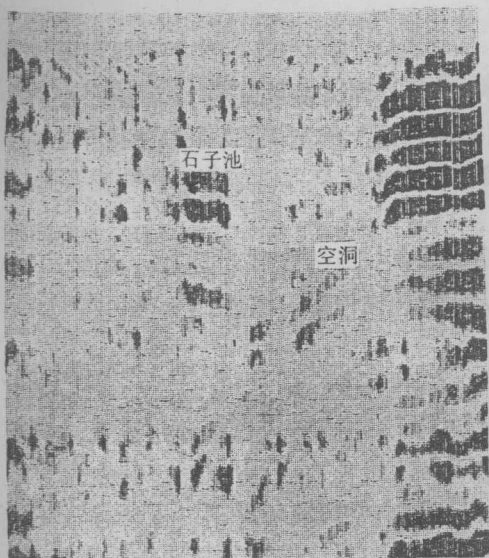


图 8

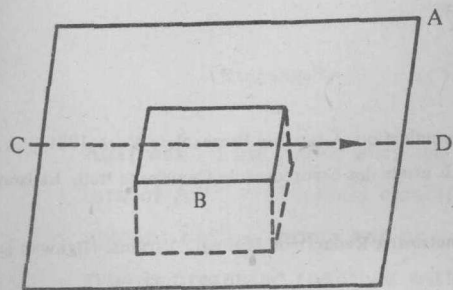


图 9

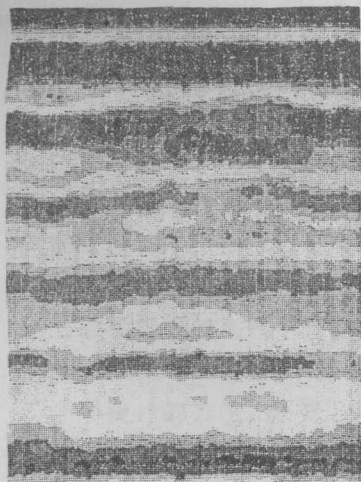


图 10

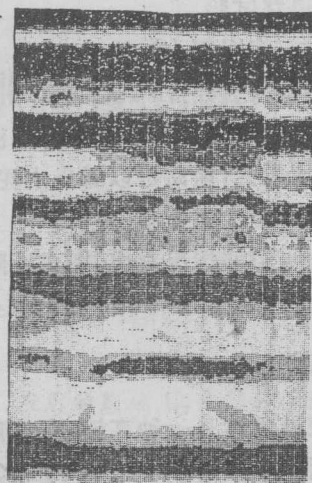


图 11

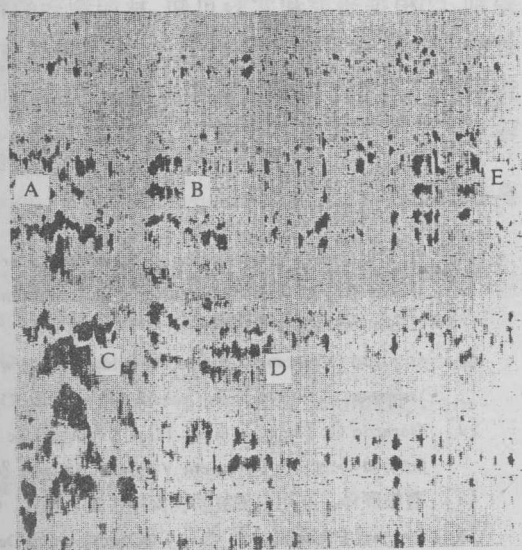


图 12

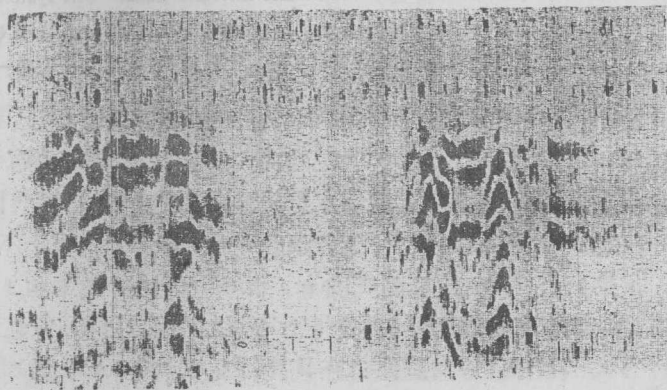


图 13

4.2 道路试验

①水泥混凝土道路

在京张公路 31 km + 900 m 处由南向北测量 100 m, 部分测试结果见图 12。由图 12 可看出, 在路面以下有明显的目标回波, 其中 A、B、E 有可能是路面下的空洞, 目标 C 的体积(或截面积)比较大, 由此可以看出水泥混凝土路面以下的情况用本雷达是可以清楚地反映出来的。

②一般水泥混凝土路

为与道路情况对比, 在本所院内测试了一段水泥混凝土路, 测试结果见图 13。由图 13 可以看出离地约 30~40cm 处有两处明显的目标, 经确认是暖气地沟和电缆沟。

5 结语

探地雷达是一种高效、方便和较直观的非破损地下探测设备, 有着广阔的应用前景。但实际使用中的效果取决于许多因素, 这是因为: ①一个地下物体能否被探地雷达探测到, 除了与该物体所在的深度和雷达的灵敏度有关外, 还取决于该物体介电常数与周围物质介电常数的差别; ②根据研究和实验可知, 被探测到的物体的雷达输出图形不一定是双曲线型, 离地面近的小物体有可能只是一个点, 大的物体有可能是一片; ③由实际的探测结果可知, 雷达探测得到的只是地下某种物体存在的一种图形而不是物理图像, 由于地下情况很复杂, 因此对雷达输出图形的判读有一定难度, 还有待于进一步的试验研究。

参考文献

- [1] H. F. Harmuth. Nonsinusoidal Wave for Radar and Radio Communication. Academic Press, New York 1981.
- [2] Daniel GIORT et al. Utilisation d'un Radar Impulsionnel Pour L'étude des Structures de Chaussées Bull. Liaison Labo. P. et Ch. — 139 — step.
- [3] Gerardo G. Clemena Surver of Bridge Decks with Ground—penetrating Radar — A Manual. Virginia Highway & transportation Research Council, July 1985, VHTRC 86—R3.
- [4] Gerardo G. Clemena et al. Final Report—Use of Ground—penetrating Radar for Detecting Voinds Underneath a Jointed Concrete Pavement Virginia Highway & transportation Research Council May 1986, VHTRC—R36.
- [5] 曹根顺译. 利用电磁波系统探测路面下洞穴. 《センサ技术》, 1989(4).
- [6] Rorbert F. Ballard Jr. Cavity Detecdtion and Delineation Research, Report 5. Electromagnetic (Radar) Techniques Applied to Cavity Detection. Techncal Report GL—83—1.
- [7] . Operation Manual—Subsurface Interface Radar—SIR system g. Geophysical Survey Sytems, Inc.
- [8] Fannian Kong. Impulse Rasar. Doctor Thesis University of Cambridge, 1983.
- [9] 孔凡年. 冲击雷达的理论与实践. 中国电子学会会议论文集——雷达系统, CIE—1986 (6).