

前视探地雷达合成孔径成像方法的研究

胡进峰 周正欧

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要 根据前视探地雷达波斜入射, 并且经过空气和地下两层介质的特点, 提出了基于等效波场和全息成像的频率波数域前视探地雷达合成孔径成像方法。该方法对地面以上的记录剖面用基于全息成像的频率波数域成像方法成像, 对地面以下记录剖面的成像, 则用地面测线处的等效波场。所提方法把两层介质中的成像问题简化成单层介质中的合成孔径成像问题。对实验数据的处理结果表明, 所提方法能有效地提高信杂比, 提高目标的方位分辨率。

关键词 前视探地雷达, 合成孔径成像, 等效接收波场

中图分类号: TN959.1+7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)12-2219-05

Research on Forward-Looking Ground Penetrating Radar Synthetic Aperture Imaging

Hu Jin-feng Zhou Zheng-ou

(College of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract According to the characteristic that Forward Looking Ground Penetrating Radar (FLGPR) wave incidents aslant and propagates through two layer medium of the air and the ground, the Frequency-Wavenumber (F-W) Synthetic Aperture Imaging (SAI) method of FLGPR is proposed based on equivalent wavefield and hologram imaging. The proposed method images the recorded section above the ground by F-W SAI based on the hologram imaging method. Then, the recorded section underground is SAI with the equivalent wave field in the swath on the ground surface. The proposed method reduces the SAI in two layers to SAI in every layer respectively. The experimental results show that the proposed method is effective.

Key words Forward looking ground penetrating radar, Synthetic aperture imaging, Equivalent wave field

1 引言

下视探地雷达已经有广泛的研究和应用^[1,2]; 而前视探地雷达具有更广泛的应用前景^[3-7]: 下视探地雷达探测时必须位于探测区域的正上方, 因此, 当被探测区域埋藏危险爆炸物或存在结构缺陷时, 下视探地雷达无能为力, 前视探地雷达则可以方便使用; 下视探地雷达通常需要贴近地面探测, 而前视探地雷达探测时可以离地较远; 下视探地雷达通常是人拖或车载, 因此对于人车不便或不能到达的地方, 下视探地雷达无法探测, 而前视探地雷达则可以在距离被探测区域较远的地方探测。

前视探地雷达由于接收后向散射信号, 目标信号很弱, 需要应用合成孔径方法提高信杂比, 同时, 通过合成孔径成像能有效地提高方位分辨率。研究探地雷达波传播的常用方法是射线追踪法^[2,6,7]。本文应用射线追踪法研究了前视探地雷达合成孔径成像方法, 通过分层成像和等效波场的方法实现了前视探地雷达合成孔径成像, 提出基于全息成像的频率波数域前视探地雷达合成孔径成像方法。全息成像方法具有

成像效果好的优点, 基于 Stolt 插值和 FFT 的频率波数域成像方法具有速度快^[1]; 所提方法结合了二者的优点。实测数据的处理结果表明所提方法是有效的。

2 前视探地雷达合成孔径成像原理和特点

在美国研制的前视探地雷达中^[3-5], 雷达天线通过水平横向运动实现合成孔径扫描, 雷达天线上下运动实现区域扫描。它的合成孔径原理如图 1, 雷达沿轨线 \overline{AB} 运动并采集数据, 实现合成孔径, 雷达照射在地面上的照射线 \overline{CD} 是雷达的地面测线^[8]。

前视探地雷达合成孔径成像的特点是(图 1): 第 1, 前视探地雷达的雷达波经过空气和地面两层介质, 并且由于雷达通常离地较高, 雷达波在空气中的传播不能忽略; 第 2, 雷达波在地面斜入射处发生折射。因此常用的下视探地雷达合成孔径成像方法不能直接应用于前视探地雷达成像。

本文通过等效波场和分层成像的方法, 将前视探地雷达合成孔径成像问题简化成单层介质中的成像问题。对地面以上的记录剖面的成像属于传统的单层媒质中的成像问题^[9], 因此可以直接应用全息合成孔径成像方法。对于地面以下的记录剖面的成像, 采用等效波场的方法把问题转化成单层介

质中的合成孔径成像,即将图1中雷达运动轨线 \overline{AB} 上接收的波场等效到地面测线 \overline{CD} 上,计算出地面测线 \overline{CD} 上的等

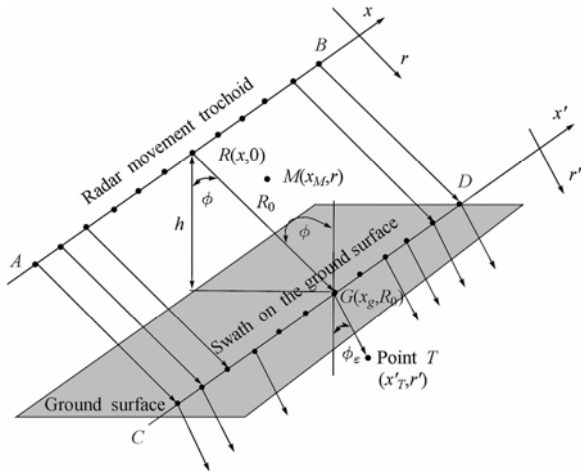


图1 前视探地雷达合成孔径成像示意图

Fig.1 The sketch map of FLGPR SAI

效波场,该等效波场可以等效地看成是雷达沿地面测线 \overline{CD} 探测时接收到的探测数据;于是地下剖面的合成孔径成像问题简化成了类似传统下视探地雷的单一介质中的合成孔径成像问题。

3 所提前视探地雷达合成孔径成像方法

图1中,雷达在高度为 h 的水平轨线 \overline{AB} 上移动,并以倾斜角 ϕ 照射地面,采集B-scan数据。 ϕ_ε 是雷达波在地下折射角: $\sin\phi/\sin\phi_\varepsilon=\sqrt{\varepsilon_r}$, $\sqrt{\varepsilon_r}$ 是地下介质的相对介电常数。

3.1 地面以上记录剖面的基于全息成像的频率波数域成像方法

建立图1右上角所示的2维直角坐标系,该坐标系以雷达运动轨线为 x 轴,以平行于雷达照射方向(即 \overline{RG} 方向)为 r 轴。设雷达天线的位置坐标为 $(x, 0)$,设雷达记录的B-scan数据为 $\mathbf{b}(x, r=0, t)$,在 t 轴上傅里叶变换后的数据为 $\mathbf{b}(x, r=0, \omega)$ 。设地面以上(包括地面)任意一个散射点 \mathbf{M} ,坐标为 (x_M, r) ,该点处的散射波场为 $\mathbf{b}(x_M, r=r_M, t=0)$ 。

由于地面以上的记录剖面成像属于单层介质中的成像问题,可以直接应用全息成像方法。浅地层探地雷达使用的多是单周期窄脉冲超宽带(UWB)雷达,因而不作距离向压缩,则直接应用全息成像方法对地面以上记录剖面中任意一点(\mathbf{M} 点)处聚焦的公式为^[1,9]

$$\mathbf{b}(x_M, r=r_M, t=0) = \int_x \frac{r^3}{R^3} \mathbf{b}\left(x, r=0, t=\frac{R}{v_1}\right) dx \quad (1)$$

其中 $r=r_M \leq h/\cos\phi$, R 是点 \mathbf{M} 到雷达的距离: $R=\sqrt{(x_M-x)^2+r^2}$; X 表示雷达的合成孔径, v_1 是雷达波在空气中的波速的一半。为了进一步推导地面测线上的等效波场,将上式改写成

$$\mathbf{b}(x_M, r=r_M, t=0) = \iint_{x, \omega} \frac{r^3}{R^3} \mathbf{b}(x, r=0, \omega) \exp\left(j\omega \frac{R}{v_1}\right) dx d\omega \quad (2)$$

设 k_ω 是波数: $k_\omega=\omega/v_1$,上式即为

$$\mathbf{b}(x_M, r=r_M, t=0) = \iint_{k_\omega, x} \mathbf{b}(x, r=0, k_\omega) \frac{r^3 v_1}{\left(\sqrt{(x_M-x)^2+r^2}\right)^3} \cdot \exp\left(jk_\omega \sqrt{(x_M-x)^2+r^2}\right) dx dk_\omega \quad (3)$$

式(3)是一个卷积的形式,该卷积可以通过傅里叶变换的乘积来计算。因此只要知道该卷积中的第2个因子的傅里叶变换,就可以计算这个卷积。式(3)中卷积的第2个因子的傅里叶变换为(对 x 傅里叶变换):

$$E(k_\omega) = \int \frac{r^3 v_1}{\left(\sqrt{x^2+r^2}\right)^3} \exp\left(jk_\omega \sqrt{x^2+r^2}\right) \exp(-jk_x x) dx \quad (4)$$

积分式(4)有如下形式:

$$I(\alpha) = \int_a^b f(x) e^{j\alpha h(x)} dx \quad (5)$$

当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时,该式可以用驻相法近似地求解^[6]:

$$I(\alpha) \approx \sqrt{\frac{2\pi}{|\alpha| |h''(x_0)|}} f(x_0) \exp\left[j\alpha(h(x_0) + \text{sgn}(h''(x_0)) \frac{\pi}{4})\right]$$

其中 x_0 是 $h(x)$ 的驻相点,即 $h'(x_0)=0$ 。比较式(4)和式(5)得到:

$$\alpha = k_x, \quad h(x) = \frac{k_\omega}{k_x} \sqrt{x^2+r^2} - x, \quad f(x) = \frac{r^3 v_1}{\left(\sqrt{x^2+r^2}\right)^3},$$

$$x_0 = \frac{rk_x}{\sqrt{k_\omega^2 - k_x^2}}, \quad \text{于是: } I(\alpha) \approx \sqrt{\frac{2\pi k_\omega}{k_\omega^2 - k_x^2}} \exp\left(jr \sqrt{k_\omega^2 - k_x^2}\right).$$

设 $k_r = \sqrt{k_\omega^2 - k_x^2}$,则

$$I(\alpha) = E(k_\omega) \approx v_1 \sqrt{2\pi k_\omega} \frac{k_r^2}{k_\omega^3} \exp(jrk_r) \quad (6)$$

将式(3)中的卷积写成傅里叶乘积的逆变换,并将式(6)代入:

$$\mathbf{b}(x_M, r=r_M, t=0) \approx \iint_K \mathbf{B}(k_x, r=0, k_\omega) v_1 \sqrt{2\pi k_\omega} \frac{k_r^2}{k_\omega^3} \cdot \exp(jrk_r + jk_x x) dk_x dk_\omega \quad (7)$$

这里 $\mathbf{B}(k_x, r=0, k_\omega)$ 是 $\mathbf{b}(x, r=0, k_\omega)$ 在 x 轴上的一维傅里叶变换。将上式中的变量 dk_ω 用 dk_r 替换,同时进行Stolt插值^[10],得到

$$\mathbf{b}(x_M, r=r_M, t=0) \approx \iint_K \mathbf{B}(k_x, r=0, k_r) v_1 \sqrt{2\pi k_\omega} \frac{k_r^3}{k_\omega^4} \cdot \exp(jrk_r + jk_x x) dk_x dk_r \quad (8)$$

上式表明,对雷达接收数据进行匹配滤波,然后在频率波数域重采样(这里是Stolt插值),最后进行2维傅里叶逆变换可以对地面以上记录剖面上任意点 (x_M, r) 进行聚焦成像。式(8)就是基于全息成像的频率波数域合成孔径成像方法,该方法由于采用Stolt插值和FFT,所以运算速度比全息成像方法快。

上述计算过程用图2中左边的虚线框表示, Δt 是A-scan

等效时间采样间隔。

根据式(7)，距雷达运动孔径为 $r = r_M$ 处在频率波数域的波场为

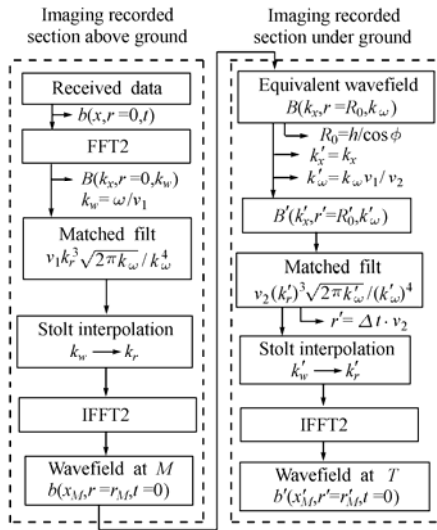


图 2 所提前视探地雷达合成孔径成像算法
Fig.2 The proposed FLGPR SAI method

$$B(k_x, r = r_M, k_w) = v_1 \sqrt{2\pi k_w} \frac{k_r^2}{k_w^3} B(k_x, r = 0, k_w) \exp(jr_M k_r) \quad (9)$$

上式表明，波场外推是一个波场的加权和移相操作的过程^[6,10]。

3.2 地下记录剖面的合成孔径成像

设雷达运动孔径到地面测线距离为 R_0 ： $r = R_0 = h/\cos\phi$ ，则根据式(7)和式(9)得到地面测线上在频率波数域的等效波场为

$$B(k_x, r = R_0, k_w) = v_1 \sqrt{2\pi k_w} \frac{k_r^2}{k_w^3} B(k_x, r = 0, k_w) \exp(jR_0 k_r) \quad (10)$$

该地面测线上的频率波数域的等效波场可以等效地看成是雷达在该地面测线上接收的数据，于是前视探地雷达中地下剖面的成像就等效地变成单层介质(地下介质)中的合成孔径成像问题，可采用与 3.1 节相同的方法成像。

假设地下介质是无损、均匀的。以地面测线 \overline{CD} 为横坐标轴 x' ，雷达波在地下照射方向为纵坐标轴 r' ，建立图 1 右下角所示的直角坐标系 (x', r') 。将地面测线处的波场写成坐标系 (x', r') 的形式：设 k'_x, k'_w 是新的坐标系中分别对应于 x', r' 的波数，则地面测线处波场 $B(k_x, r = R_0, k_w)$ 与新坐标系中的波场 $B'(k'_x, r' = 0, k'_w)$ 对应关系为 $k'_x = k_x$ ， $k'_w = k_w v_1 / v_2$ 。根据式(8)，任意一点 $T(x'_T, r')$ 的频率波数域快速成像公式为

$$b'(x'_T, r', t = 0) \approx \iint_K v_2 \sqrt{2\pi k'_w} \frac{(k'_r)^3}{(k'_w)^4} B'(k'_x, r' = 0, k'_r) \cdot \exp(jr'_T k'_r) \exp(jk'_x x'_T) dk'_x dk'_r \quad (11)$$

其中 $k'_r = \sqrt{(k'_w)^2 - (k'_x)^2}$ ， v_2 是雷达波在地下传播速度的半速度。

用地面测线处的等效波场对地下记录剖面成像的计算步骤如图 2 中右边的虚线框所示。所提前视探地雷达合成孔径成像方法的完整计算步骤如图 2，通过左边的虚线框所示步骤对地面以上的记录剖面成像，然后根据地面测线上的等效波场按照右边虚线框所示步骤对地下记录剖面成像，从而实现前视探地雷达合成孔径成像。

4 实测数据的处理结果

实测数据是雷达在 5(长)×3(宽)×2(深)m³的沙坑采集的。图 3 是实验现场相片。雷达脉冲宽度为 2ns，A-scan 的等效采样频率是 8099MHz，A-scan 空间采样间隔是 0.9cm。3 组数据中用到的可口可乐饮料瓶(以下简称可乐瓶)的尺寸是 10(直径)×25(长)cm²，小矿泉水瓶的尺寸是 6.5(直径)×20(长)cm²。



图 3 实验设置

Fig.3 Experimental equipment

第 1 组数据是单目标探测，如图 4：雷达沿支架水平运动并以 45° 的倾斜角照射地面，雷达天线辐射面的中心距地面高度为 66cm；目标是装水的可乐瓶，平放并埋在湿沙下 38cm 深处，距雷达支架水平距离是 71cm。图 5 是雷达探测的原始图像，图 6 是用均值法滤波后的图像，左右两边的杂波是池壁反射的杂波。图 7 是对图 6 用所提方法合成孔径后的图像。与图 6 相比，图 7 中的信杂比有了较大的增强，目标信号更清晰，并且目标信号的方位分辨率也有了较大的提高。图 7 中，地面以上的杂波是傅里叶变换引入的，可以通过在合成孔径前对数据加窗来抑制^[2]。

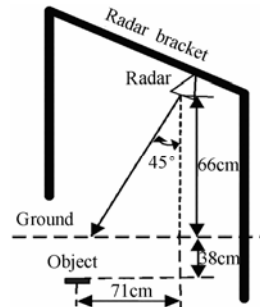


图 4 实验参数(第 1 组数据)
Fig.4 Experiment parameter

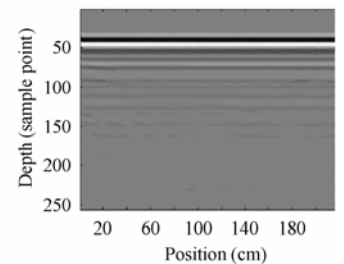


图 5 雷达探测原始图像(第 1 组)
Fig.5 The raw radar image

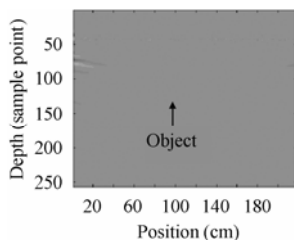


图6 均值法滤波后的图像(第1组数据)
Fig.6 After clutter reduced

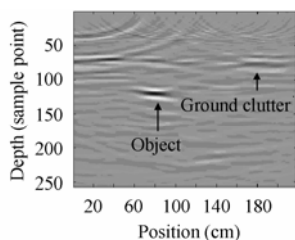


图7 所提方法合成孔径图像(第1组数据)
Fig.7 SAI with the proposed method

第2组数据是方位向双目标探测(图8),两个目标都是装水的小矿泉水瓶子埋于湿沙下面,埋深分别为19.5cm和20cm;两目标距雷达支架的水平距离都是71cm。两目标之间的水平距离是25cm。图9是雷达原始探测图像,图10是经过均值法滤波后的图像,两个目标基本上看不出来。图11是所提方法合成孔径处理后的结果,图中信杂比有较大的提高,并且两个目标被比较清楚的区分开来,说明所提方法可以较有效提高目标的方位分辨率。图11中,目标的左上方和右上方较强的杂波是残留的地表杂波。

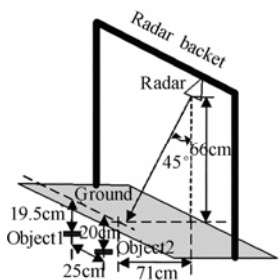


图8 实验参数(第2组数据)
Fig.8 Experiment parameter

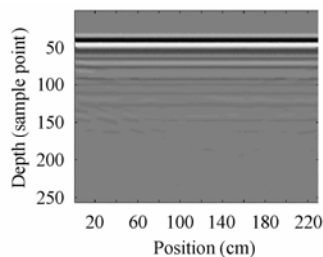


图9 雷达探测的原始图像
Fig.9 The raw radar image

第3组数据是距离向双目标探测(图12)。两个目标平放并埋于湿沙下面,目标1是装水的小矿泉水瓶子,埋深10cm,目标2是装水的可乐瓶子,埋在目标1的正下方,埋深38cm。图13是雷达探测原始图像;图14是经过均值法滤波后的图像,信杂比较低,目标信号不明显。图15是经过合成孔径处理后的图像,两个目标被比较明显的区分开。图15说明,合成孔径成像虽然不能提高距离向分辨率,但由于能有效地提高信杂比并有效提高方位向分辨率,所以也有助于距离向的目标的区分。

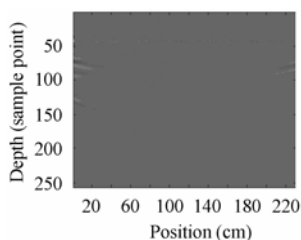


图10 均值法滤波后(第2组数据)
Fig.10 After clutter reduced

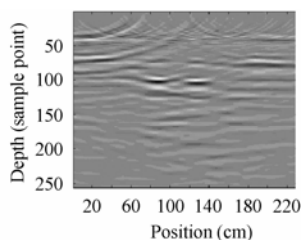


图11 所提方法合成孔径成像(第2组数据)
Fig.11 SAI with the proposed method

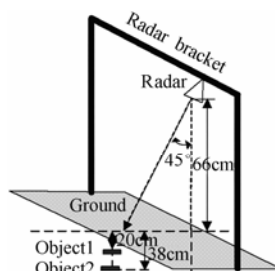


图12 实验参数(第3组数据)

Fig.12 Experiment parameter

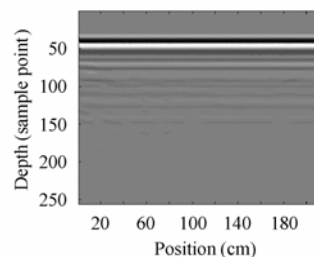


图13 雷达探测原始图像(第3组数据)

Fig.13 The raw radar image

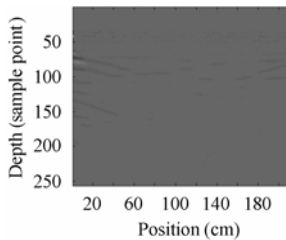


图14 经过均值法滤波后(第3组数据)

Fig.14 After clutter reduced

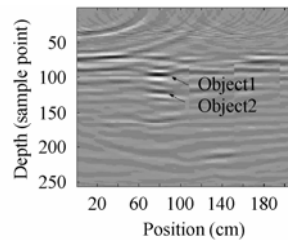


图15 所提方法合成孔径成像(第3组数据)

Fig.15 SAI with the proposed method

5 结束语

用分层成像和等效波场的方法,并将全息成像方法引入前视探地雷达中,推导了基于 Stolt 插值的前视探地雷达合成孔径成像方法。并通过等效场的方法实现前视探地雷达合成孔径成像。全息成像方法具有成像效果好的特点,但处理速度较慢,而基于 Stolt 偏移的 FFT 方法虽然具有较快的处理速度,但合成孔径后垂直分辨率降低;所提方法将全息成像方法和 Stolt 方法结合起来,因此具有较快的处理速度,但不降低垂直分辨率。对实测数据处理结果表明,所提方法能较有效地提高信杂比,并且能较有效地提高方位分辨率。

参考文献

- [1] 张立国,孔令讲,周正欧. 浅地层探地雷达合成孔径处理的一种快速算法[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(10): 1645-1649.
- [2] Scheers B. Ultra-wideband ground penetrating radar with application to the detection of anti-personnel landmines[D]. [Ph.D thesis]. Royal Military Academy Department of Electrical Engineering and Telecommunication, Brussels. 2001.
- [3] Cosgrove R B, Milanfar P, Kositsky J. Trained detection of buried mines in SAR images via the deflection optimal criterion[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(11): 2569-2575.
- [4] Sun Y, Li J. Time-frequency analysis for plastic landmine detection via forward-looking ground penetrating radar[J]. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2003, 150(4): 253-261.
- [5] Sun Y, Li X, Li J. Practical landmine detector using forward looking ground penetrating radar[J]. *Electronics Letters*, 2005,

- 41(2): 97-98
- [6] Gu K, Wang G, Li J. Migration based SAR imaging for ground penetrating radar system[J]. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2004, 151(5): 317-325.
- [7] Guasch J F. A novel 3-D subsurface radar imaging technique [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(2): 443-452.
- [8] Peter T G, Bobby R H. Synthetic aperture radar image reconstruction algorithms designed for subsurface imaging[J]. *IGARSS'97, IEEE Proc.*1997, vol. 4: 1588-1590.
- [9] Osumi N, Ueno K. Microwave holographic imaging method with improved resolution[J]. *IEEE Trasn. on Antennas and Propagation*, 1984, AP-32(10): 1018-1026.
- [10] Eide E S. Radar imaging of small objects closely below the earth surface[D].[Ph.d thesis]. Norwegian University of Science and Technology, August, 2000.
- 胡进峰: 男, 1976年生, 现为清华大学电机工程与应用电子技术系博士后, 主要研究方向为探地雷达信号处理、通信对抗。
- 周正欧: 男, 1940年生, 教授, 博士生导师, 目前正从事探地雷达、数据传输等方面的研究。