

一种用于地基雷达数据成像处理的数字波束形成算法

乞耀龙^{1,2,3} 王彦平^{1,3} 李湖生^{1,3} 张兴凯¹

(1. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012; 2. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083;
3. 矿山采空区灾害防治国家安全监管总局安全生产重点实验室, 北京 100012)

摘要: 地基雷达是微波成像基于地面平台的应用, 具有可重复观测、稳定、可控的特点, 可应用于露天矿边坡形变、城区沉降、山体滑坡等领域的长期观测。然而, 目前的地基雷达基本成像原理是通过机械运动形成合成孔径, 采集时间较长, 不适用于快速监测。基于多通道阵列天线的雷达通过阵列天线阵元之间的电子切换扫描实现阵列方向的聚焦, 可以满足快速监测的需求。本文在地基雷达中引入阵列电子扫描的工作模式, 大幅度提高数据获取效率, 推导了在方位向采用数字波束形成方法聚焦的处理过程。具体的, 首先建立了阵列扫描的地基雷达成像几何, 继而推导了应用于地基雷达实测数据成像处理的数字波束形成算法, 形成了阵列扫描地基雷达的数据处理流程, 最后, 通过边坡实测数据的成像处理, 验证了本文成像方法及处理流程的有效性, 并通过强散射体的成像指标, 分析了成像性能。

关键词: 地基雷达; 阵列天线; 数字波束形成

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2015)10-1313-05

Digital Beam Forming Algorithm for Ground-based Radar Imaging Processing

QI Yao-long^{1,2,3} WANG Yan-ping^{1,3} LI Hu-sheng^{1,3} ZHANG Xing-kai¹

(1. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China;
2. School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3. Key Laboratory of Goaf Disasters Prevention, State Administration of Work Safety, Beijing 100012, China)

Abstract: Ground-based radar means microwave imaging radar carried by ground-based platform, which can achieve stable, controllable and repeatable observations. For having the advantages above, it can be applied to long-term observations of slope deformation, urban subsidence, landslides and other areas. However, the basic imaging principle of current ground-based radar is synthetic aperture formed by mechanical movement, which takes a long data acquisition time and is not suitable for fast deformation monitoring. Multi-channel antenna array radar can achieve the focusing along azimuth via electronically switch among elements of antenna array, which is much faster than mechanical scanning and can meet the needs of rapid monitoring. This paper introduces the imaging mode based on antenna array into ground-based radar, which greatly improve the efficiency of data acquisition, meanwhile, the digital beam forming is used in the process of ground based radar data. Firstly, the ground-based radar imaging geometry based on antenna array is established. Then, the paper deduces the digital beam forming algorithm for the geometry and describes the procedure of ground based radar data. Finally, by processing the measured slope data, the paper verifies the imaging geometry and method, meanwhile, the imaging performance is analyzed via the imaging results of corner reflectors.

Key words: ground-based radar; antenna array; digital beam forming

1 引言

地基雷达是星载、机载雷达工作模式在地面的

应用。其基本原理是通过在距离向发射和接收电磁波信号, 进行脉冲压缩, 并结合方位向的机械平台运动形成合成孔径, 对电磁波信号相干积累来形

成二维图像。地基雷达具有稳定可控的特点,可以对观测区域进行长期重复观测,且平台稳定,可以实现零基线干涉^[1-3]。

由于具备以上特点,地基雷达已成为露天矿边坡形变、城区沉降、山体滑坡等领域的重要发展方向,然而,目前已投入应用的地基雷达在方位向主要采用机械运动形成合成孔径,采集时间较长,只能应用于长时间的微小形变监测,无法兼顾快变区域的监测,在快速形变监测应用方面受到局限。而在实际应用中,观测区域中可能短时间内变化较大的区域,或者受天气、环境快速变化的影响,观测条件发生变化,这些情况都会导致观测图像之间相干性降低,影响干涉精度和效果^[4-5]。

基于多通道阵列天线的雷达通过阵列天线阵元之间的电子切换扫描实现阵列方向的聚焦^[6-7],可以满足上述快速形变监测的需求。采用阵列天线的工作模式,则需要用阵列信号处理的方法进行成像,数字波束形成算法是通过调节阵列天线中每个天线阵元加权,使阵列主瓣指向期望方向,并且在干扰方向形成零陷,实现良好聚焦^[8]。

本文引入了多通道阵列扫描的工作模式,采用阵元之间的电子切换扫描代替机械扫描,提高数据获取效率,大幅度缩减监测周期,同时适应快速、缓慢形变监测的应用。本文建立基于阵列扫描的地基雷达成像几何和信号模型,推导了基于数字波束形成的方位向聚焦算法,给出了地基雷达阵列成像的处理流程,通过实测数据的成像处理,验证和分析了本文成像方法的性能。

2 阵列电子扫描的地基雷达成像方法

本节采用阵列电子扫描的工作模式,建立地基雷达的成像几何,以步进频连续波为信号形式,推导了相应的回波模型及成像方法。

2.1 成像几何

如图1所示。阵列天线固定于地面平台,由若干阵元组成,阵元之间收发电磁波信号形成 N 个收发通道。在距离向,每个阵元通道发射和接收宽带电磁波信号,实现距离向的空间分辨;在方位向,不同收发通道通过电子开关的切换扫描依次收发信号,并通过不同位置的信号合成来实现方位向的空间分辨。

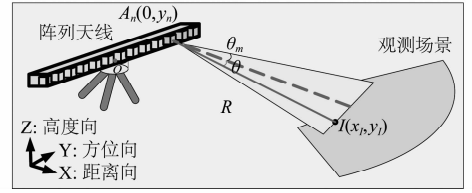


图1 成像几何

Fig. 1 Imaging geometry

图中, N 个阵元通道之间的阵元间隔为 d ,阵列长度为 $L=(N-1) \cdot d$ 。设 $A_n(0, y_n)$ 代表第 n 个阵元通道的位置, $y_n=L/2-(n-1)d, i=1, 2, \dots, N$,设每个阵元在方位向对观测场景中任一散射点 $I(x_l, y_l)$ 的观测角为 θ ,通过不同的 θ 可以将阵列所形成波束的主瓣指向空间不同的方向,从而实现将波束的主瓣对准目标信号。

2.2 回波模型

设雷达系统采用步进频连续波信号(Stepped-Frequency Continuous Wave, SFCW)。步进频连续波雷达的工作原理是通过发射一系列特定频率范围内的连续波脉冲,然后直接对接收信号的频域进行采样,并对回波进行傅里叶反变换(IFFT)。其特点是通过一系列脉冲来实现大带宽信号,从而获得距离向高空间分辨率,在获得高分辨率的同时降低了数字信号处理机对瞬时带宽的要求^[9],下面分析和推导图1所示成像几何下的回波模型。

设散射体 $I(x_l, y_l)$ 的散射截面为 $\sigma(I)$,则对于给定的目标 I ,天线阵元 A_n 获取的回波数据为,

$$E_l(f_k, y_n) = \sqrt{\sigma(I)} \cdot \text{rect}\left(\frac{y_n}{L}\right) \cdot$$

$$\exp(-j \cdot 4\pi f_k R(y_n)/c), f_k = f_0 + k \cdot \Delta f \quad (1)$$

其中, f_k 为步进频连续波信号的频率, f_0 是起始频率, Δf 是频率间隔, k 是脉冲数。 $\text{rect}\left(\frac{y_n}{L}\right)$ 为矩形窗, L 是窗的宽度, y 是阵元在方位向的坐标,天线阵元 A_n 与目标 $I(x_l, y_l)$ 的距离为,

$$R(y_n) = |A_n - I| = \sqrt{(0 - x_l)^2 + (y_n - y_l)^2} \quad (2)$$

为防止严重的散焦,需要满足由距离近似引起的相位变化小于 $\frac{\pi}{4}$,即距离近似引起的距离变化小于 $\frac{\lambda}{16}$,在满足以上近似条件下,进行展开,

$$R(y_n) = R(0) + y_n \frac{\partial R}{\partial y_n} = R_0 + \frac{y_n - y_l}{R(y_n)} \cdot y_n =$$

$$R_0 + \sin(\theta_n) \cdot y_n \quad (3)$$

其中, $\sin(\theta_n)$ 为阵元 A_n 相对于目标 I 的观测角。

采用阵列成像几何,阵元在各通道之间存在幅相不一致性,会影响成像的结果。对于 N 副阵元组成的均匀线阵,其通道幅相误差可以表示为如下与方位无关的向量,

$$\mathbf{F} = [\rho_1 \exp(j\varphi_1), \rho_2 \exp(j\varphi_2), \dots, \rho_N \exp(j\varphi_N)] \quad (4)$$

其中, ρ_n 表示第 n 个阵元的幅度误差, φ_n 表示第 n 个阵元的相位误差。考虑上式的误差,天线阵元 A_n 测得的回波数据变为,

$$E_l(f_k, y_n) = \rho_n \exp(j\varphi_n) \sqrt{\sigma(I)} \cdot \text{rect}\left(\frac{y_n}{L}\right) \cdot \exp(-j \cdot 4\pi f_k R(y_n)/c) \quad (5)$$

2.3 基于数字波束形成的方位向压缩

本节研究了基于数字波束形成的成像方法。在距离向通过脉冲压缩技术实现距离向的分辨率,在方位向使用波束形成原理来实现方位向分辨率。

对于式(5)中的回波信号模型,首先进行多通道幅相误差的估计和补偿^[10-11],得到补偿后的信号,

$$E_l(f_k, y_n) = \sqrt{\sigma(I)} \cdot \text{rect}\left(\frac{y_n}{L}\right) \cdot \exp(-j \cdot 4\pi f_k R(y_n)/c) \quad (6)$$

对于步进频信号,直接在距离向进行 IFFT,实现距离向压缩,对上式进行 IFFT 处理,同时设 $\sqrt{\sigma(I)} = 1$,可得,

$$e_l(m, y_n) = \sum_{k=0}^{K-1} E_l(f_k, y_n) \exp\left\{j \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot m \cdot k\right\} = \exp\left\{-j \cdot \frac{2\pi}{c} [2f_0 + (K-1)\Delta f] \cdot R(y_n)\right\} \cdot \text{sinc}\left[\pi K \left(\frac{m}{K} - \frac{2\Delta f \cdot R(y_n)}{c}\right)\right] \quad (7)$$

令 $2f_c = 2f_0 + (K-1)\Delta f$,其中 f_k 为距离向的频率, f_c 为中心频率,则上式变形为,

$$e_l(m, y_n) = \exp\left\{-j \cdot \frac{4\pi f_c}{c} \cdot R(y_n)\right\} \cdot \text{sinc}\left[\pi M \left(\frac{m}{K} - \frac{2 \cdot \Delta f \cdot R(y_n)}{c}\right)\right] \quad (8)$$

将式(3)代入上式可得,

$$e_l(m, y_n) = \exp\left\{-j \cdot \frac{4\pi f_c}{c} \cdot R_0\right\} \cdot$$

$$\exp\left\{-j \cdot \frac{4\pi f_c}{c} \cdot \sin(\theta_n) \cdot y_n\right\} \cdot \text{sinc}\left[\pi M \left(\frac{m}{K} - \frac{2 \cdot \Delta f \cdot R(y_n)}{c}\right)\right] \quad (9)$$

根据波束形成的原理,将每个阵元从空间不同方向所接收的信号分别进行加权求和可以形成某个方向的波束,加权求和时的矢量决定波束的指向,设阵元的输入信号为 $Y(t) = [y_1(t), y_2(t) \dots y_N(t)]^T$,与阵元输入信号对应的加权矢量为 $W = [w_1, w_2 \dots w_N]^T$,加权相乘就可以得到阵列的输出,

$$S(t) = W^T \cdot Y(t) = \sum_{n=1}^N w_n \cdot y_n(t) \quad (10)$$

权矢量决定波束的指向,目的是指向目标信号,同时对干扰及噪声进行有效抑制。

针对(9)中的第二个相位,给定加权矢量,

$$w_n = \exp\left\{j \cdot \frac{4\pi f_c}{c} \cdot y_n \cdot \sin(\theta_n)\right\} \quad (11)$$

对式(9)通过以上加权矢量加权求和可得,

$$e(m, y_n) = \sum_{n=1}^N w_n \cdot e_l(m, y_n) = \sum_{n=1}^N e_l(m, y_n) \cdot \exp\left\{j \cdot \frac{4\pi f_c}{c} \cdot y_n \cdot \sin(\theta_n)\right\} \quad (12)$$

从而实现了回波信号方位向的压缩。

3 阵列扫描地基雷达的数据处理流程

根据第 2 节所述的信号模型可知,阵列扫描地基雷达的数据处理主要包括以下几个步骤:

1) 估计并校正阵列幅相一致性误差

本文基于回波数据的方法对多通道幅相误差进行了估计和补偿,首先是利用回波数据中包含的天线 A_n 位置信息补偿天线位置的延时;对补偿后的回波数据进行傅里叶反变换,此时得到的时域回波信号的 0 位置即反映了阵元 A_n 所在收发通道的信号强度和相位,从而可以估计出不同收发通道之间相对的幅相误差 ρ_n 和 φ_n ;最后用估计的结果对每幅阵元 A_n 所采集的回波数据进行补偿,得到补偿后的回波信号(6)^[12]。

2) 距离向压缩

在距离向进行 IFFT,得到距离向压缩后的信号(7),

3) 基于数字波束形成原理的方位向压缩

设定加权矢量加权求和,得到方位向压缩后的信号(12)。

综上所述,阵列扫描地基雷达系统的数据处理流程如图2所示。

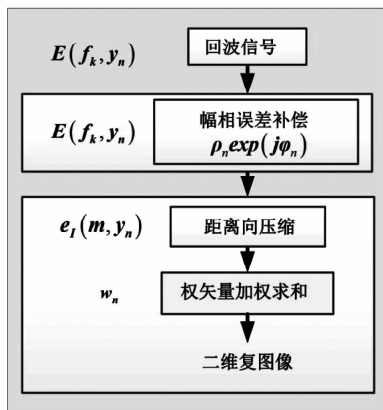


图2 数据处理流程

Fig.2 Flow chart of data processing

4 成像实验

本节通过对边坡实测数据的处理,验证了本文的成像几何和成像处理方法。

4.1 实验场景及实验参数

阵列扫描地基雷达实验的采集几何如图1所示。观测场景为某矿山边坡,如图3,本实验为成像实验,在场景中布置了三个角反射器作为强散射点,如图中三个红色圆点表示。



图3 实验场景

Fig.3 Observed scene

主要实验参数如下。

表1 实验参数

Tab.1 Experimental parameters

参数	数值
频率/GHz	17 ~ 17.5
距离向 采样点数	10001 点
带宽/MHz	500
方位向 阵元通道数	190
阵列长度/m	1.7

4.2 数据处理及指标分析

按照第3节中所述的数据处理过程,对回波数据进行处理,成像结果如图4所示,由图可知,成像结果聚焦良好,可以表征观测场景的信息。本文提出的阵列地基雷达成像处理方法和处理流程是有效的。

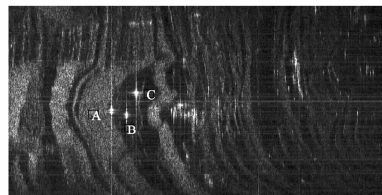


图4 成像结果

Fig.4 Imaging result

同时,本文以三个角反射器 A、B、C 为例,分析了成像指标,如图5和表2所示,表2中的分辨率理论值是根据信号带宽和阵列参数计算的。从表中可知,三个强散射体的理论值和实际值相符。

表2 成像指标理论值与实际值对比

Tab.2 Theoretical value and the actual value

目标	方位向理论值/m	方位向实际值/m	距离向理论值/m	距离向实际值/m
1	0.5712	0.5736	0.3	0.3997
2	0.6259	0.6293	0.3	0.3997
3	0.6602	0.6646	0.3	0.3997

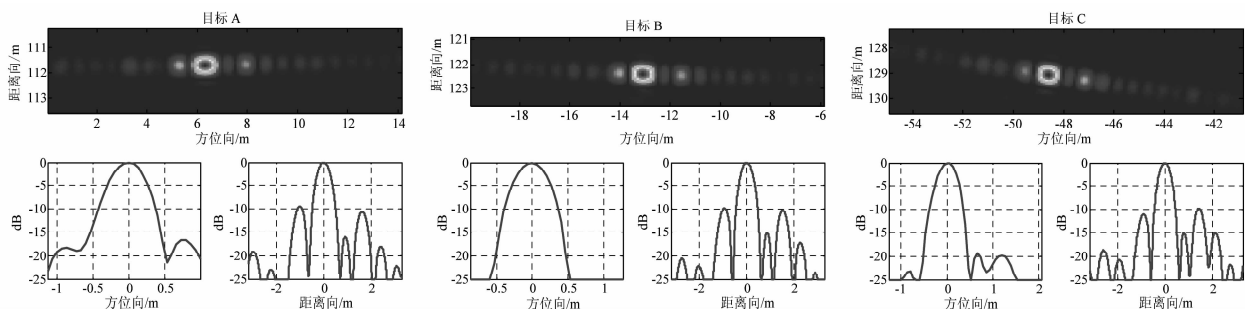


图5 三个角反射器的成像指标

Fig.5 Imaging performance of the corner reflectors

5 结论

本文研究了基于数字波束形成算法的地基雷达数据处理。具体的,采用阵列电子扫描作为地基雷达的工作模式,建立了相应的几何和回波模型;推导了距离向脉冲压缩、方位向数字波束形成的二维成像方法;并推导了阵列扫描地基雷达的数据处理流程;开展了地基雷达实测试验,实验结果表明,本文的模型和方法、以及数据处理流程是有效的,本文的研究对于阵列成像在地基雷达中的应用具有重要的实际意义。

参考文献

- [1] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Inverse Problems*, 1998, 14(4):1-54.
- [2] Qi Yaolong, Yang Xiaolin, Wang Yanping, et al. Calibration and Fusion of SAR and DEM in Deformation Monitoring Applications[C]//European Conference on Synthetic Aperture Radar 2014, 3-5 June, Berlin, Germany, 2014.
- [3] Kazuo O. Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5:716-807.
- [4] 曲世勃,王彦平,谭维贤,等.地基 SAR 形变监测误差分析与实验[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(1):1-7.
Qu Shibo, Wang Yanping, Tan Weixian, et al. Deformation Detection Error Analysis and Experiment Using Ground Based SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(1):1-7. (in Chinese)
- [5] 曲世勃. 地基 SAR 区域形变信息提取方法研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所, 2010.
Qu Shibo. Methods on Regional Deformation Extraction using Ground Based SAR[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [6] Weiß M, Ender J. A 3D imaging radar for small unmanned airplanes-ARTINO [C]//European Radar Conference 2005, 6-7 October, Paris, France, 2005: 209-212.
- [7] 匡开峰,徐友根,刘志文. 共形阵列非圆信号波达方向估计算法[J]. *信号处理*, 2015, 31(5):551-558.
Kuang Kaifeng, Xu Yougen, Liu Zhiwen. Direction of

Arrival Estimation for Noncircular Signals Using Conformal Array[J]. *Journal of Signal Processing*, 2015, 31(5):551-558. (in Chinese)

- [8] Marwan Y, Christian F. Digital Beam-forming in SAR Systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(71):1735-1739.
- [9] Yang Jungang, Thompson J, Huang Xiaotao, et al. Random-Frequency SAR imaging based on compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(2):983-994.
- [10] Fornaro G, Reale D, Serafino F. 4D SAR Focusing: A Tool for Improved Imaging and Monitoring of Urban Areas [C]//IGARSS 2008.
- [11] Chernov N, Huang Q, Ma H. Fitting Quadratic Curves to Data Points [J]. *British Journal of Mathematics & Computer Science*, 2014, 4(1): 33-60.
- [12] Qi Yaolong, Yang Xiaolin, Tan Weixian, et al. Research on the Microwave Snapshot Imaging Radar Based on antenna array [C]// IET International Radar Conference 2013, 14-16 April, Xian, China, 2014.

作者简介



乞耀龙 男,1984 年生,河北南宫人,中国安全生产科学研究院,博士后,主要研究方向为地基合成孔径雷达系统、阵列雷达成像等。
E-mail:longgni@163.com



王彦平 男,1976 年生,山东临沂人,中国安全生产科学研究院,研究员,博士生导师,主要研究方向为干涉 SAR、雷达信号处理等。
E-mail:jwkj2012@189.cn

李湖生 男,1969 年生,甘肃秦安人,中国安全生产科学研究院,副总工程师,主要研究方向为安全生产理论、应急管理理论、应急信息技术、应急指挥决策技术等。
E-mail:lihs@chinasafety.ac.cn

张兴凯 男,1961 年生,河北滦南人,中国安全生产科学研究院,总工程师,主要研究方向为安全管理与工程等。
E-mail:zhangxk@chinasafety.ac.cn