

基于时分 MIMO 的地基雷达高分辨率成像研究

蒋留兵^{*①②} 杨涛^② 车俐^{①②}

^①(广西无线宽带通信与信号处理重点实验室(桂林电子科技大学) 桂林 541004)

^②(桂林电子科技大学信息与通信学院 桂林 541004)

摘要: 基于时分多输入多输出(MIMO)的地基雷达成像有许多很好的应用价值,比如替代合成孔径雷达成像在山地滑坡监测方面的应用。针对基于时分 MIMO 的地基雷达高效高分辨率成像,该文提出一种基于逆傅里叶变换脉冲压缩和波束形成的成像算法。雷达通过步进频连续波技术获得高距离向分辨率,利用 MIMO 技术获得高方位向分辨率。通过逆傅里叶变换法实现雷达数据距离向压缩,采用波束形成算法实现雷达数据方位向压缩。同时该算法还针对 MIMO 天线阵列所引起的回波信号相位不连续问题进行了适当的校正,在保持算法高效性的同时提高了成像质量。根据真实的山体滑坡监测成像场景参数,通过数值仿真验证了该成像算法的可行性,应用在山体滑坡监测上理论效果良好。

关键词: 雷达成像; 时分 MIMO 雷达; 高分辨率; 波束形成; 逆傅里叶变换脉冲压缩

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)05-1055-09

DOI: 10.11999/JEIT150905

Study on High-resolution Imaging of Ground-based MIMO Radar Based on Time-division Multiplexing

JIANG Liubing^{①②} YANG Tao^② CHE Li^{①②}

^①(Guangxi Wireless Broadband Communication and Signal Processing Key Laboratory, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

^②(School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Ground-based radar imaging based on time-division multiplexing MIMO can be used in many important applications, such as application to landslide monitoring in place of synthetic aperture radar imaging. For efficient high-resolution imaging of the ground-based radar based on time-division multiplexing MIMO, an imaging algorithm based on Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) pulse compression and beamforming is proposed. High range resolution is obtained by stepped frequency continuous wave technology and high azimuth resolution is obtained by MIMO technology. The range compression of radar data is realized by IFFT and the cross-range compression of radar data is realized by beamforming algorithm. Furthermore, phase discontinuity problem of received signal caused by MIMO antenna arrays is appropriately corrected in the algorithm, both efficiency of this algorithm and imaging quality are also improved. A numerical simulation proves feasibility of this imaging algorithm according to the practical parameters in monitoring and imaging scenario of landslide, and the proposed imaging algorithm has good theoretical performance when it is applied to landslide monitoring.

Key words: Radar imaging; Time-division multiplexing MIMO radar; High-resolution; Beamforming; Inverse Fast Fourier Transform(IFFT) pulse compression

1 引言

雷达自从诞生以后,经过了几十年的发展,雷

达技术已经得到了广泛的应用。尤其是雷达成像技术的出现,雷达技术的应用上升到了一个新的层次。雷达成像技术已经在军事侦察、环境保护、地理测绘和灾情预警等方面广泛应用^[1]。本文主要针对山体滑坡监测预警方面的应用进行雷达成像技术研究。目前应用在山体滑坡监测方面的典型成像系统有:欧洲联合研究中心(Joint Research Centre of the European Commission)研制的 LISA(Linear SAR)雷达成像系统^[2,3]、佛罗伦萨大学和 IDS 公司联合研制的 IBIS(Image By Interferometry Survey)雷达成像系统^[2,4]。这些雷达系统利用雷达天线运动合成较大的等效天线孔径来实现较高方位向分辨率,这样就需要雷达天线的运动速度以及天线在运动过程中

收稿日期: 2015-07-30; 改回日期: 2016-01-20; 网络出版: 2016-03-14

*通信作者: 蒋留兵 jlbj@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61561010), 广西自然科学基金项目(2013GXNSFAA019323), 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻 14122006-6), 广西教育厅科研发项项目(KY2015LX096), 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室主任基金项目(GXKL061506) Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61561010), Guangxi Natural Science Foundation (2013-GXNSFAA019323), Guangxi Scientific Research and Technological Development Project (guikegong 14122006-6), Guangxi Department of Education Research Project (KY2015LX096), Project of Guangxi Key Laboratory of Wireless Broadband Communications and Signal Processing Director Foundation (GXKL061506)

收发信号的位置都必须精准地控制^[5,6], 否则将影响测量的精度, 从而给控制设备提出很高的要求, 同时也严重限制了雷达数据采集的速度^[7]。MIMO 雷达成像系统可以很好地克服上述问题, 然而一些经典高效的成像算法, 如距离多普勒算法和 CS(Chirp Scaling)算法, 无法直接运用于 MIMO 雷达成像系统^[8]。文献[8]中 MIMO 雷达采用后向投影(BP)算法进行成像, 虽然文献[8]对标准 BP 算法进行了改进, 但是方位向雷达数据压缩依然采用串行方式, 极大地影响了雷达成像的效率, 不利于实际工程应用。文献[9]虽然采用了波束形成算法对雷达数据进行方位向压缩, 提高了成像算法效率, 但是文献[9]没有考虑 MIMO 雷达天线阵列引起的回波信号相位不连续的问题。本文在时分 MIMO 雷达体制下利用步进频信号获得高距离向分辨率和 MIMO 天线阵列形成的多个虚拟阵元获得高方位向分辨率, 通过逆傅里叶变换进行距离向数据压缩, 对 MIMO 天线阵列引起的回波信号相位不连续问题进行适当校正后, 利用波束形成算法进行方位向数据压缩。

2 基于时分 MIMO 的地基雷达成像系统

基于时分 MIMO 的地基雷达成像系统主要由信号产生单元、信号调制单元、射频前端放大单元、天线分时选择器、天线分时控制单元、系统同步控制单元、低噪声放大单元、正交解调单元、数据采集单元和信号处理单元组成。所谓时分 MIMO 就是 MIMO 天线阵列采用分时发射和分时接收的工作模式, 这样避免了 MIMO 发射信号的正交性和接收端的匹配滤波^[10]。虽然这种工作模式一定程度上降低了 MIMO 雷达的数据采集速度, 但很大程度上简化了雷达系统的架构, 降低了雷达系统成本, 比如这种模式下只需要一套信号发射设备和信号采集设备即可。

整个雷达系统在系统同步控制单元的控制和协调下, 由信号产生单元产生步进频连续波信号, 数字基带步进频信号经过数模转换后送入信号调制单元, 雷达信号被调制到雷达工作频段后, 通过射频前端放大单元将信号功率放大。最后由 MIMO 发射天线阵列按分时工作模式将信号发射出去, 同时 MIMO 接收天线阵列分时接收雷达回波信号。信号的分时发射和接收均在天线分时控制单元的协调和控制下进行。回波信号接收后经过低噪声放大单元将回波信号放大。将放大后的回波信号进行正交解调, 然后对回波信号进行采集。最后采集好的雷达数据送入信号处理单元进行成像处理。

3 基于时分 MIMO 的地基雷达成像系统信号处理

3.1 雷达信号发射和回波信号采集

雷达系统的 MIMO 发射天线阵列由 M 个阵元组成, 天线间隔为 $(N/2)\lambda$, 接收天线阵列由 N 个阵元组成, 天线间隔为 $\lambda/2$, λ 为信号波长^[11,12]。MIMO 天线排布为 1 维线阵, 且收发天线阵列均关于原点对称排布。雷达按如下规则发射和接收信号: 每个发射天线发射 N 组脉冲, 每组脉冲包含 Q 个子脉冲, M 个天线在天线分时控制单元的控制下分时依次发射。同时每个发射天线发射的 N 组脉冲在天线分时控制单元的控制下依次由 N 个接收天线分时接收, 每个接收天线接收其中一组脉冲。 M 个天线发射完即完成一次监测区域扫描。

假设雷达中心坐标位置为 $(0,0,H)$, 监测区域中某目标的位置坐标为 (x_1, z_1, h_1) 。则该目标到雷达收发天线的斜距和表示如下:

$$R = \sqrt{(x_m - x_1)^2 + z_1^2 + (H - h_1)^2} + \sqrt{(x_n - x_1)^2 + z_1^2 + (H - h_1)^2} \quad (1)$$

式(1)中, $(x_m, 0, H)$ 和 $(x_n, 0, H)$ 分别为 MIMO 天线阵列收发天线的位置坐标。鉴于地基 MIMO 雷达天线阵列成 1 维线阵排布, 雷达无法同时在 h 和 z 方向做出区分^[13], 因此在雷达 2 维成像中令 $y_1 = \sqrt{z_1^2 + (H - h_1)^2}$, 则式(1)演变为式(2), 根据式(2)可以将雷达成像用 x, y 两维来表示, x, y 两维构成雷达实际 2 维成像面。

$$R = \sqrt{(x_m - x_1)^2 + y_1^2} + \sqrt{(x_n - x_1)^2 + y_1^2} \quad (2)$$

发射信号中单个脉冲用复数形式表示为 $S(t)$, 如式(3), 其中 $f_i = f_0 + i\Delta f$, f_0 为脉冲起始频率, Δf 为频率步进量, $\text{rect}(t)$ 为单位矩形函数, Tr 为发射信号脉冲宽度, 它等于发射脉冲重复周期。则第 m 个发射天线发射的一组脉冲信号为 $S_m(t)$, 如式(4), 其中 A_m 为第 m 个发射天线发射信号的能量。

$$S(t) = \exp(j2\pi f_i t) \text{rect}(t - i \text{Tr}), \quad i \in (0, 1, \dots, Q-1) \quad (3)$$

$$S_m(t) = A_m \sum_{i=0}^{Q-1} \exp(j2\pi f_i t) \text{rect}(t - i \text{Tr}), \quad m \in (1, 2, \dots, M) \quad (4)$$

雷达信号照射监测区域后, 回波信号被接收天线分时接收。接收阵列的第 n 根天线接收到由发射阵列第 m 根天线发射信号的回波, 并将该观测通道称为 mn 观测通道, 将该观测通道回波信号放大后进行正交下变频, 最后将其采集, 称其为 $\tilde{S}'_{mn}(t)$,

如式(5)。 τ_m^n 表示该观测通道产生的时延，如式(6)所示， (x_1, y_1) ， $(x_n, 0)$ ， $(x_m, 0)$ 分别为目标和收发天线的坐标， c 表示光速， δ 表示目标散射系数。

$$\tilde{S}_{mn}(t) = A_m \delta \exp(j2\pi f_i(-\tau_m^n)),$$

$$i \in (0, 1, 2, \dots, Q-1) \quad (5)$$

$$\tau_m^n = \frac{\sqrt{(x_1 - x_n)^2 + y_1^2} + \sqrt{(x_1 - x_m)^2 + y_1^2}}{c} \quad (6)$$

一个通道数据采集完后进行堆栈存储，一次雷达照射监测区域后得到一个回波数据矩阵。将它记为 $\mathbf{I}[MN, Q]$ ， MN 表示MIMO天线阵列所形成的观测通道数， Q 表示步进频信号每组脉冲的单脉冲个数，式(5)所表示的数据就是数据矩阵的第 mn 行数据。

3.2 本文所提雷达成像算法

3.2.1 基于逆傅里叶变换法的雷达数据距离向聚焦

文献[8]和文献[9]采用发射正交波形和接收端进行相应的匹配滤波来分离出各观测通道的信号，同时通过匹配滤波实现雷达数据距离向压缩。本文鉴于时分MIMO雷达体制，采用时分的方法分离出各通道数据，发射步进频信号，通过逆傅里叶变换脉冲压缩法实现雷达数据距离向压缩。

如3.1节所述，雷达采集完数据后得到一个原始雷达数据矩阵 $\mathbf{I}[MN, Q]$ ，具体表述如式(7)：

$$\mathbf{I}[MN, Q] = \begin{bmatrix} E_{11,0} & E_{11,1} & \cdots & E_{11,i} & \cdots & E_{11,Q-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{mn,0} & E_{mn,1} & \cdots & E_{mn,i} & \cdots & E_{mn,Q-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{MN,0} & E_{MN,1} & \cdots & E_{MN,i} & \cdots & E_{MN,Q-1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中， $E_{mn,i} = A_m \delta \exp(j2\pi f_0(-\tau_m^n)) \exp(j2\pi i \Delta f(-\tau_m^n))$ 。

在密集布阵情况下，MIMO雷达天线尺寸远小于监测区域目标到雷达天线的距离，距离向不会出现明显的距离徙动，即距离徙动小于一个距离分辨率单元，所以距离向不作距离徙动校正。因此，距离向数据压缩只需要进行逆傅里叶变换(IFFT)即可。对 $\mathbf{I}[MN, Q]$ 矩阵按行分别进行逆傅里叶变换，如它的 mn 行数据进行IFFT^[14,15]如式(8)，其中 $k \in (0, 1, \dots, Q-1)$ 。令 $t_k \in k/B$ ， B 为信号带宽，进一步整理式(8)，如式(9)。

$$S_r(k) = \frac{A_m \delta}{Q} \exp(-j2\pi f_0 \tau_m^n) \cdot \exp\left(j\pi \frac{Q-1}{Q} (k - Q\Delta f \tau_m^n)\right) \cdot \frac{\sin(\pi(k - Q\Delta f \tau_m^n))}{\sin\left(\frac{\pi}{Q}(k - Q\Delta f \tau_m^n)\right)} \quad (8)$$

$$S_r(t_k) = \frac{A_m \delta}{Q} \exp(-j2\pi f_0 \tau_m^n) \text{sinc}(\pi B(t_k - \tau_m^n)) \quad (9)$$

将式(6)所示时延曲线按幂级数展开，省略高方次项，得式(10)。

$$\tau_m^n \approx \frac{2R_1 - \frac{x_1}{R_1}(x_m + x_n) + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{x_1^2}{R_1^3}\right)(x_m^2 + x_n^2)}{c} \quad (10)$$

其中， $R_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ ，对于距离向而言式(10)第2、第3项可以忽略，余 $\frac{2R_1}{c}$ ，代入式(9)得：

$$S_r(t_k) \approx \frac{A_m \delta}{Q} \exp(-j2\pi f_0 \tau_m^n) \text{sinc}\left(\pi B\left(t_k - \frac{2R_1}{c}\right)\right) \quad (11)$$

令 $S_{a,mn} = (A_m \delta / Q) \exp(-j2\pi f_0 \tau_m^n)$ ， $U_k = \text{sinc}\left(\pi B\left(t_k - \frac{2R_1}{c}\right)\right)$ ，经过距离向压缩后，雷达数据矩阵表示如式(12)：

$$\mathbf{I}_1[MN, Q] = \begin{bmatrix} S_{a,11}U_0 & S_{a,11}U_1 & \cdots & S_{a,11}U_k & \cdots & S_{a,11}U_{Q-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{a,mn}U_0 & S_{a,mn}U_1 & \cdots & S_{a,mn}U_k & \cdots & S_{a,mn}U_{Q-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{a,MN}U_0 & S_{a,MN}U_1 & \cdots & S_{a,MN}U_k & \cdots & S_{a,MN}U_{Q-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.2.2 雷达数据回波相位不连续校正处理 方位向雷达数据压缩是对 $S_{a,mn}$ 项进行操作。将经过距离向压缩后的雷达数据转换到极坐标下， θ 为监测区域目标 (x_1, y_1) 的波达角，且根据式(10)得到 $S_{a,mn}$ 的相位，如式(13)：

$$\varphi_m^n = -\frac{2\pi}{\lambda} (2R_1 - \sin\theta(x_m + x_n)) - \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{(\sin\theta)^2}{R_1} \right) (x_m^2 + x_n^2) \quad (13)$$

在3.1节所述MIMO雷达布阵方式下， $x_m = \left(m-1 - \frac{M-1}{2}\right)d_t$ ， $x_n = \left(n-1 - \frac{N-1}{2}\right)d_t$ ， d_t ， d_r 分别为接收天线和发射天线间隔，由式(13)得到第 n 个接收天线分别接收相邻发射天线 m ， $m+1$ 的回波信号的相位差，如式(14)。同理得到相邻接收天线 n ， $n+1$ 分别接收同一发射天线 m 的回波信号的相位差，如式(15)。

$$\varphi_{m+1}^n - \varphi_m^n = \frac{2\pi}{\lambda} d_t \sin\theta - \frac{2\pi \cos^2\theta}{\lambda R_1} \left(m - \frac{M}{2}\right) d_t^2 \quad (14)$$

$$\varphi_m^{n+1} - \varphi_m^n = \frac{2\pi}{\lambda} d_r \sin\theta - \frac{2\pi \cos^2\theta}{\lambda R_1} \left(n - \frac{N}{2}\right) d_r^2 \quad (15)$$

较传统线性阵列，MIMO天线阵列在稀疏布置的情况下会存在较为严重的回波相位不连续的现象。

$$\mathbf{I}_2[Q, MN] = \begin{bmatrix} S'_{r,110}Y_{11} & S'_{r,111}Y_{11} & \cdots & S'_{r,11k}Y_{11} & \cdots & S'_{r,11Q-1}Y_{11} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S'_{r,mn0}Y_{mn} & S'_{r,mn1}Y_{mn} & \cdots & S'_{r,mnk}Y_{mn} & \cdots & S'_{r,mnQ-1}Y_{mn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S'_{r,MN0}Y_{MN} & S'_{r,MN1}Y_{MN} & \cdots & S'_{r,MNk}Y_{MN} & \cdots & S'_{r,MNQ-1}Y_{MN} \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

3.2.3 基于波束形成法的雷达数据方位向聚焦 雷达回波数据校正后, 利用波束形成算法^[16]对雷达数据进行方位向压缩。首先计算出各观测通道的时延补偿因子, 组成一个补偿因子矩阵, 即为 \mathbf{S}_{bf} 。根据滑坡监测区域几何形状, 计算出监测区域波达角的覆盖范围, 比如监测区域距离向从 R_{\min} 到 R_{\max} , 方位向从 $-x$ 到 x , 则波达角范围为 $(-\arctan(x/R_{\min}), \arctan(x/R_{\min}))$ 。将其均分为 L 份, 得 θ_l 如式(21)。令 $P_{l,mn} = \exp(-j2\pi f_0 \sin \theta_l (x_m + x_n)/c)$, 波束形成补偿因子如式(22):

$$\theta_l = \frac{2 \arctan\left(\frac{x}{R_{\min}}\right)}{L-1} l - \arctan\left(\frac{x}{R_{\min}}\right), \quad l \in (0, 1, \dots, L-1) \quad (21)$$

$$\mathbf{S}_{bf} = \begin{bmatrix} P_{0,11} & P_{1,11} & \cdots & P_{l,11} & \cdots & P_{L-1,11} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{0,mn} & P_{1,mn} & \cdots & P_{l,mn} & \cdots & P_{L-1,mn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{0,MN} & P_{1,MN} & \cdots & P_{l,MN} & \cdots & P_{L-1,MN} \end{bmatrix} \quad (22)$$

不考虑发射功率的变化, 令 $A_m = A$, $X_{k,l} = \text{sinc}(\pi B (t_k - 2R_1/c)) \text{sinc}(MN/2\pi(\sin \theta - \sin \theta_l))$, 方位向采用波束形成算法进行数据压缩的具体操作如式(23):

$$\mathbf{I}_3[Q, L] = \mathbf{I}_2[Q, MN] \cdot \mathbf{S}_{bf}[MN, L] =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{A\delta MN}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_1}{c}\right) X_{0,0} & \cdots & \frac{A\delta MN}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_1}{c}\right) X_{0,l} & \cdots & \frac{A\delta MN}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_1}{c}\right) X_{0,L-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{A\delta MN}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_1}{c}\right) X_{k,0} & \cdots & \frac{A\delta MN}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_1}{c}\right) X_{k,l} & \cdots & \frac{A\delta MN}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_1}{c}\right) X_{k,L-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{A\delta MN}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_1}{c}\right) X_{Q-1,0} & \cdots & \frac{A\delta MN}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_1}{c}\right) X_{Q-1,l} & \cdots & \frac{A\delta MN}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_1}{c}\right) X_{Q-1,L-1} \end{bmatrix} \quad (23)$$

通过以上信号处理流程, 原始雷达数据被很好地聚焦成像, 例如监测区域某目标的波达角为 θ_l , 斜距为 R_1 , 目标将显示在第 (k, l) 像素点处。每个像素点由相位和幅度值组成。

4 本文所提成像算法分辨率分析

距离向分辨取决于雷达发射信号带宽 B , 距离向分辨率具体由式(24)计算得到^[1]:

$$\rho_r = c/(2B) \quad (24)$$

从波束形成的角度推导方位向分辨率, 式(20)的第 k 行与式(22)的第 l 列相乘得:

$$I(k, l) = A_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(\exp\left(j2\pi f_0 \frac{\sin \theta - \sin \theta_l}{c} x_m\right) \cdot \exp\left(j2\pi f_0 \frac{\sin \theta - \sin \theta_l}{c} x_n\right) \right) \quad (25)$$

其中, $A_0 = \text{sinc}\left(\pi B \left(t_k - \frac{2R_1}{c}\right)\right) \frac{A\delta}{Q} \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R_1}{c}\right)$ 。

因 $x_m = \left(m-1 - \frac{M-1}{2}\right) d_t$, $x_n = \left(n-1 - \frac{N-1}{2}\right) d_r$, d_t , d_r 分别为接收天线和发射天线间隔, 由式(25)计算得:

$$I(k, l) = A_0 \exp\left(j2\pi \frac{\sin \theta - \sin \theta_l}{\lambda} \cdot \frac{M-1}{2} d_t\right) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{\sin \theta - \sin \theta_l}{\lambda} \cdot \frac{N-1}{2} d_r\right) \cdot \frac{\sin\left(\pi \frac{\sin \theta - \sin \theta_l}{\lambda} M d_t\right)}{\sin\left(\pi \frac{\sin \theta - \sin \theta_l}{\lambda} d_t\right)} \cdot \frac{\sin\left(\pi \frac{\sin \theta - \sin \theta_l}{\lambda} N d_r\right)}{\sin\left(\pi \frac{\sin \theta - \sin \theta_l}{\lambda} d_r\right)} \quad (26)$$

又因 $\sin \theta = x_1/R_1$, $\sin \theta_l = (x_1 + \Delta x)/R_1$, Δx 为方位向脉冲压缩曲线的 3 dB 点, L_t , L_r 分别为发

天线阵列长度。忽略常数 A_0 ，令方位向分辨率 $\rho_a = 2\Delta x$ ，则由式(27)求解出方位向分辨率。

$$\left| \frac{\sin\left(\pi \frac{\rho_a(L_t + d_t)}{2\lambda R_1}\right) \sin\left(\pi \frac{\rho_a(L_r + d_r)}{2\lambda R_1}\right)}{\sin\left(\pi \frac{\rho_a}{2\lambda R_1} d_t\right) \sin\left(\pi \frac{\rho_a}{2\lambda R_1} d_r\right)} \cdot \frac{1}{(L_t + d_t)(L_r + d_r)} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (27)$$

从表达式(27)可以得知方位向分辨率与 MIMO 雷达收发阵列长度和天线间间隔有关系，同时还与载频波长和目标距离有关。增加收发阵列的长度及收发天线间的间距可以提高方位向分辨率，而目标的距离增加将降低方位向分辨率，载频波长变长也将降低方位向分辨率。

5 基于时分 MIMO 的地基雷达成像数值仿真

为了验证所提算法的正确性，在本节进行数值仿真实验。根据山体滑坡监测成像的实际应用环境设置雷达仿真参数和成像场景。进行数值仿真时，雷达的成像区域为：距离向从 1000 m 到 2000 m，

方位向为 -150 m 到 150 m，式(18)中的 $R_0=1500$ m。同时可以计算出成像区域波达角覆盖范围为 $-8.53^\circ \sim 8.53^\circ$ 。雷达仿真的主要参数如表 1 所示。

首先进行单点目标成像仿真，目标的位置为：方位向 0 m，距离向 1300 m，目标散射系数为 1。数值仿真实验中 L 设为 500，逆傅里叶变换的点数设为 16384 点。不对 MIMO 天线阵列引起的回波信号相位不连续问题进行校正，也就是采用文献[9]所述的 MIMO 雷达成像方位向数据聚焦方法进行成像，数值仿真实验结果如图 2(a)所示。接着采用本文所提成像算法，即对 MIMO 天线阵列引起的回波信号相位不连续问题进行了适当校正，数值仿真实验结果如图 2(b)所示。本文所成图像均只显示包含目标部分。

从图 2 可知两种成像算法均能够对目标进行准确地成像。为了进一步分析成像质量，绘制出点目标的距离向和方位向的脉冲压缩曲线如图 3 所示。通过图 3，从距离向和方位向脉冲压缩曲线的 3 dB 点获得雷达成像的分辨率和峰值旁瓣比，具体如表 2 所示，同时通过式(24)和式(27)计算出雷达成像的理论分辨率如表 2 所示。

表 1 主要仿真雷达参数

发射天线数 M	22	频率步长 Δf	0.07324 MHz
接收天线数 N	22	频率带宽 B	300 MHz
脉冲重复频率 PRF	50 kHz	频率步进数	4096
起始频率 f_0	15 GHz		

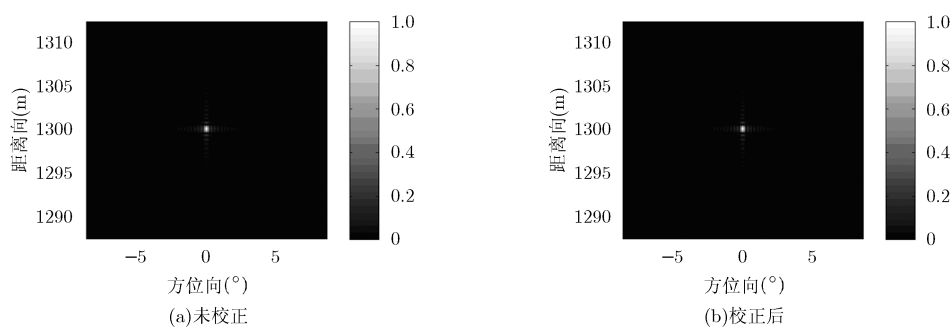


图 2 单点目标影像幅值图

表 2 数值仿真成像分辨率、理论成像分辨率和峰值旁瓣比

		峰值旁瓣比(dB)	分辨率	理论分辨率
校正后	距离向	-13.47	0.43 m	0.50 m
	方位向	-13.32	3.63 mrad	3.67 mrad
未校正	距离向	-13.47	0.43 m	0.50 m
	方位向	-12.20	3.69 mrad	3.67 mrad

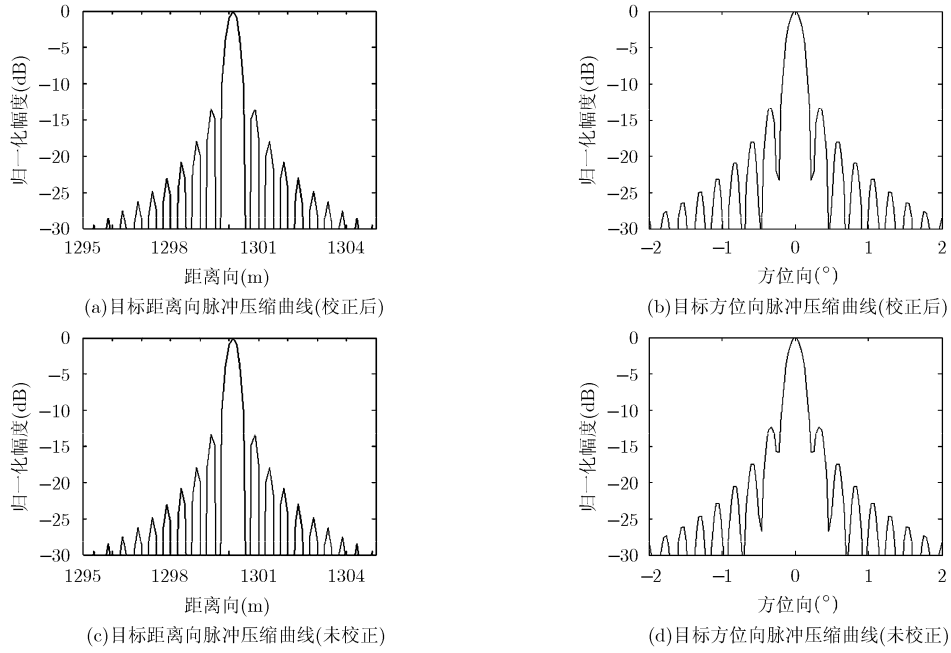


图3 目标脉冲压缩曲线

分析表2数据可知，数值仿真成像的分辨率与理论计算成像分辨率基本吻合。数值仿真成像距离向分辨率优于理论分辨率是由数值仿真时作逆傅里叶变换的点数远超过实际采样点数所造成的^[17]，实际分辨率还是服从式(24)所述。较文献[9]所述成像算法，经过对回波信号相位不连续问题进行校正后，图像的方位向分辨率提高了，且方位向峰值旁瓣比下降了1.12 dB，方位向聚焦成像更好，本文算法成像质量更高。

为了进一步说明MIMO雷达回波信号相位不连续问题造成的影响，根据不同的MIMO天线阵列稀疏度，在表1参数基础上做了几组对比实验，结果如表3所示。从表3可知回波相位不连续对本文成像算法的方位向分辨率和峰值旁瓣比影响不大，而文献[9]所述成像算法的方位向分辨率和峰值旁瓣比波动较大。进而说明本文成像算法对MIMO雷达回波相位不连续的校正是有效的，提高了成像的质量。

不失一般性，利用本文算法对多目标进行数值成像仿真。目标的位置信息为：tg1在距离向1303.8 m和方位向-100 m处；tg2在距离向1303.8 m和方位向100 m处；tg3在距离向1301 m和方位向-50 m

处；tg4在距离向1301 m和方位向50 m处；tg5在距离向1250.2 m和方位向-25 m处；tg6在距离向1250.2 m和方位向25 m处；tg7在距离向1300 m和方位向0 m处；tg8在距离向1302 m和方位向0 m处。设目标的散射系数均为1，数值仿真成像结果如图4(a)，从图4(a)可以得知本文成像算法对多目标进行了准确和清晰的成像。

同时为了测试本文成像算法在山体滑坡监测方面的应用效果，本文对之前所述的一些目标设置了微小形变值：tg2雷达视线上出现-3 mm微小形变；tg3雷达上出现-4 mm微小形变；tg6雷达视线上出现-3.5 mm微小形变；tg8雷达视线上出现-4.5 mm微小形变。设置相关目标有形变之后，再次成像结果如图4(b)所示。然后根据差分干涉原理^[18]探测所监测目标的形变情况。监测到区域有4处目标发生微小形变，具体形变情况如下：tg2雷达视线上出现-3.032 mm微小形变；tg3雷达视线上出现-4.023 mm微小形变；tg6雷达视线上出现-3.56 mm微小形变；tg8雷达视线上出现-4.504 mm微小形变，与预先设置形变值基本一致，理论监测误差均在5%以内。

表3 MIMO天线阵列不同稀疏度下的数值仿真结果

d_t / d_c (m)	校正后的峰值旁瓣比(dB)	未校正的峰值旁瓣比(dB)	校正后方位向分辨率(mrad)	未校正方位向分辨(mrad)
0.66/0.03	-13.05	-6.31	3.64	4.24
0.33/0.015	-13.28	-11.02	3.63	3.73
0.22/0.01	-13.32	-12.20	3.63	3.69

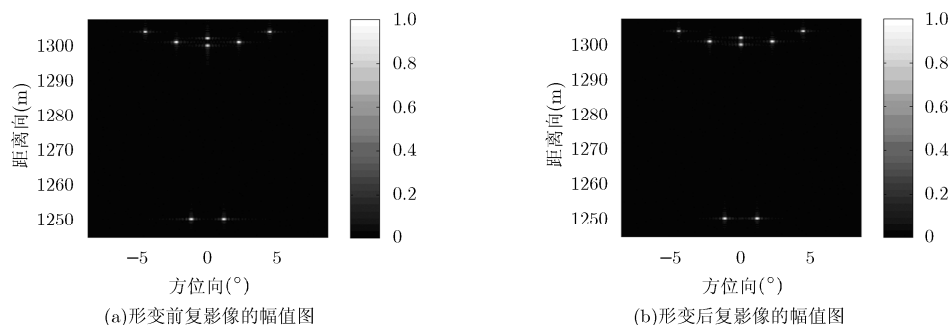


图 4 多目标复影像幅值图

6 结束语

本文在基于时分 MIMO 的地基雷达的基础上研究高分辨率成像, 雷达通过时分方式发送步进频信号获取高距离向分辨率, 利用 MIMO 技术获取高方位向分辨率。鉴于这样一个基础, 本文提出了采用逆傅里叶变换脉冲压缩结合波束形成的高效成像算法, 算法对 MIMO 天线阵列引起的回波信号相位不连续问题进行了适当校正。最后通过数值仿真实验验证了本文成像算法的可行性, 校正后成像质量得到提高。同时也通过数值仿真验证了所提成像算法在山体滑坡监测方面应用的可行性, 可以为基于时分 MIMO 的地基山体滑坡监测雷达系统的实物研制提供理论支撑。目前本文仅对所提成像方法进行了理论仿真论证, 后续的研究争取采用实测数据进行验证分析。

参考文献

- [1] 皮亦鸣, 杨建宇, 付毓生, 等. 合成孔径雷达成像原理[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2007: 1-16.
PI Yiming, YANG Jianyu, FU Yu-sheng, *et al.* Synthetic Aperture Radar Imaging Principle[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2007: 1-16.
- [2] MONSERRAT O, CROSETTO M, and LUZI G. A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 93: 40-48. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.04.001.
- [3] LEVA D, NICO G, TARCHI D, *et al.* Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(4): 745-752. doi: 10.1109/TGRS.2003.808902.
- [4] HAKOBYAN A, MCGUIRE P, POWER D, *et al.* Applications and validation tests of ground-based coherent radar for deformation and vibration measurements in Canada's Atlantic region[C]. 2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Halifax, NS, 2015: 638-642. doi: 10.1109/CCECE.2015.7129349.
- [5] LUO Y, SONG H, WANG R, *et al.* Arc FMCW SAR and applications in ground monitoring[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(9): 5989-5998. doi: 10.1109/TGRS.2014.2325905.
- [6] MAO C, LIU F, NI C, *et al.* GB-SAR deformation monitoring: Performance analysis and primary experimental results[C]. IET International Radar Conference 2013, Xi'an, 2013: 1-6. doi: 10.1049/ep.2013.0192.
- [7] TARCHI D, OLIVERI F, and SAMMARTINO P F. MIMO radar and ground-based SAR imaging systems: equivalent approaches for remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 425-435. doi:10.1109/TGRS.2012.2199120.
- [8] 王怀军, 黄春琳, 陆珉, 等. MIMO 雷达反向投影成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(8): 1567-1573. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.08.03.
WANG Huaijun, HUANG Chunlin, LU Min, *et al.* Back projection imaging algorithm for MIMO radar[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(8): 1567-1573. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.08.03.
- [9] 王伟, 马跃华, 王咸鹏. 一种高运算效率的 MIMO 雷达 BP 成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(10): 2080-2085. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.10.11.
WANG Wei, MA Yuehua, and WANG Xianpeng. Highcomputation efficiency BP imaging algorithm for MIMO radar[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(10): 2080-2085. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.10.11.
- [10] KLARE J and SAALMANN O. MIRA-CLE X: a new imaging MIMO-radar for multi-purpose applications[C]. 2010 European Radar Conference (EuRAD), Paris, 2010: 129-132.
- [11] SAMMARTINO P F, TARCHI D, and BAKER C J. MIMO radar topology: A systematic approach to the placement of the antennas[C]. 2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Torino,

- 2011: 114-117. doi: 10.1109/ICEAA.2011.6046337.
- [12] 顾福飞, 池龙, 张群, 等. 基于压缩感知的稀疏阵列 MIMO 雷达成像方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2452-2457. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00287.
- GU Fufei, CHI Long, ZHANG Qun, *et al.* An imaging method for MIMO radar with sparse array based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2452-2457. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00287.
- [13] 王怀军. MIMO 雷达成像算法研究[D]. [博士论文]. 国防科学技术大学, 2010: 39-50.
- WANG Huaijun. MIMO radar imaging algorithm[D]. [Ph.D. dissertation], University of Defense Technology, 2010: 39-50.
- [14] YANG J, HUANG X, JIN T, *et al.* Synthetic aperture radar imaging using stepped frequency waveform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(5): 2026-2036. doi: 10.1109/TGRS.2011.2170176.
- [15] WU X F, WANG X S, and LU H Z. Motion feature extraction for stepped frequency radar based on Hough transform[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(1): 17-27. doi: 10.1049/iet-rsn. 2009.0100.
- [16] 陈洁, 方广有, 李芳. 时域波束形成在超宽带穿墙成像雷达中的应用[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1341-1344.
- CHEN Jie, FANG Guangyou, and LI Fang. The application of Time domain beamforming to ultra-wideband through-wall imaging radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(6): 1341-1344.
- [17] TANSER D J. Simulation of a slope stability radar for opencast mining[D]. [Master dissertation], Department of Electrical Engineering, University of Cape Town, 2003: 10-18.
- [18] 隆华平. 利用地基干涉雷达 IBIS-FL 监测露天矿边坡形变研究[J]. 工程勘察, 2014, 42(11): 68-73.
- LONG Huaping. Study on deformation monitoring of open pit slop by ground-based interferometric radar IBIS-FL[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2014, 42(11): 68-73.
- 蒋留兵: 男, 1973年生, 研究员, 主要研究方向为雷达信号处理、智能信号处理.
- 杨涛: 男, 1989年生, 硕士, 主要研究方向为MIMO雷达成像技术及其在微小形变探测方面的应用.
- 车俐: 女, 1977年生, 高级实验师, 主要研究方向为雷达信号处理.