

一维镜像综合孔径的近场相位校正方法

黄煜行^{1,2}, 李青侠^{1,2}, 李育芳^{1,2}, 雷振羽^{1,2}, 牛升达³, 曹志宇³

(1. 华中科技大学 电子信息与通信学院, 湖北 武汉 430074; 2. 多谱信息处理技术重点实验室, 湖北 武汉 430074;
3. 上海卫星工程研究所, 上海 201109)

摘要: 镜像综合孔径微波辐射成像的原理基于远场条件推导, 不适用于近场成像。为了解决近场条件下的镜像综合孔径成像问题, 本文推导了近场双天线互相关表达式, 发现近场双天线互相关可以表示为远场双天线互相关与近场相位因子的乘积。校正该相位因子后, 即可使用反余弦变换进行近场亮温重建, 从而解决了近场条件下的成像问题。本文提出了两种基于外部点源的近场相位校正方法, 并分别对点源目标及展源目标进行了仿真, 仿真结果表明: 校正后的亮温重建误差较小, 从而验证了这两种方法的有效性。

关键词: 一维镜像综合孔径(1D-MAS); 近场成像; 外部点源; 近场相位校正; 亮温重建

中图分类号: TP 722.6

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2023.01.009

Near-Field Phase Correction Method for One-Dimensional Mirrored Aperture Synthesis

HUANG Yuhang^{1,2}, LI Qingxia^{1,2}, LI Yufang^{1,2}, LEI Zhenyun^{1,2}, NIU Shengda³, CAO Zhiyu³

(1. School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Science and Technology on Multi-spectral Information Processing Laboratory, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The imaging principle of mirrored aperture synthesis (MAS), which is derived based on far-field conditions, is not suitable for near-field imaging. In order to solve this problem, the expression of the dual-antenna cross-correlation under near-field conditions is derived, which is a product of the far-field dual-antenna cross-correlation and the near-field phase factor. After eliminating the near-field phase factor, the inverse cosine transform can be used to reconstruct the brightness temperature under near-field conditions. In this paper, two near-field phase correction methods based on external sources are proposed. Simulations on the point source target and the extended source target are carried out, respectively. After the near-field phase correction, the error of the brightness temperature reconstruction becomes small, which verifies the effectiveness of these methods.

Key words: one-dimensional mirrored aperture synthesis (1D-MAS); near-field imaging; external point source; near-field phase correction; bright temperature reconstruction

0 引言

被动微波遥感由于能够直接反映出地物的内在物理特征信息^[1], 被广泛应用于大气、海洋、植被、土壤、冰川等方面的相关研究, 在这些研究中, 空间分辨率是一个至关重要的指标^[2]。传统的实孔径成像方

法的空间分辨率完全取决于天线尺寸的大小, 为了实现较高的空间分辨率, 需要制造较大的天线, 这成为实孔径成像方法中的一个固有矛盾。研究人员提出的综合孔径成像方法^[3]解决了该矛盾, 该方法能够在提高空间分辨率的同时, 有效减小单元天线的尺

收稿日期: 2022-02-23; 修回日期: 2022-06-13

基金项目: 中国航天科技集团有限公司第八研究院产学研合作资助基金(SAST2020-033)

作者简介: 黄煜行(1997—), 男, 博士, 主要研究方向为微波遥感。

通信作者: 李青侠(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微波遥感。

寸^[4]。国内外的研究人员已经研制出了较多综合孔径系统,例如:ESTAR^[5]、MIRAS^[6-7]、GeoSTAR^[8]、2D-STAR^[9]、HUST-ASR^[10]、BHU-2D^[11]。与之相对应的是,综合孔径系统的复杂度较高,例如 Geo-STAR具有上百根天线、数千个相关器。

为了在较低的系统复杂度下获得较高的空间分辨率,近年来,研究人员提出了镜像综合孔径(Mirrored Aperture Synthesis, MAS)的概念^[12-13]。MAS通过引入反射板,扩展了等效接收阵列的尺寸,从而可以在使用相同天线阵列的情况下,获得了更高的空间分辨率。

综合孔径和MAS的原理推导均基于理想远场情况,不适用于近场成像。针对综合孔径的近场成像问题,研究人员进行了研究,并提出了相位修正的方法^[14]。但是针对MAS的近场成像问题,现在仍然缺乏相关的研究。为了补全这方面的研究,本文推导了近场条件下双天线互相关的表达式,分析了近场双天线互相关与远场双天线互相关之间的关系,在此基础上,提出了2种基于外部点源的近场相位校正方法,仿真了这2种校正方法对点源、展源成像的使用情况,仿真结果证明了2种近场相位校正方法的有效性。

1 近场相位校正方法的理论分析

一维镜像综合孔径(One Dimensional Mirrored Aperture Synthesis, 1D-MAS)在远场条件下的原理如图1所示。

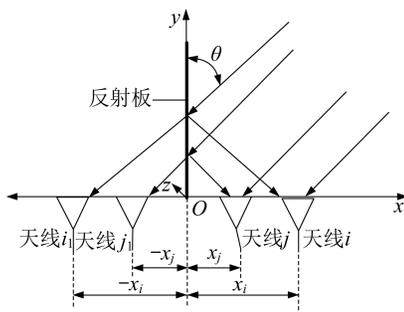


图1 远场条件下1D-MAS的原理

Fig. 1 Schematic diagram of the 1D-MAS principle under far-field conditions

如图1所示,由于远场条件,天线阵列可以被视为一个点,从而目标场景的每个微元到阵列中各个天线的入射角 θ 相等。图中,天线*i*和天线*j*分别是接收天线阵列中的任意两个天线,这两个天线到反射板的距离分别为 x_i 和 x_j 。天线 i_j 分别是天线*i*和天线*j*关

于反射板对称的镜像天线。天线*i*和天线*j*的互相关(简称“远场双天线互相关”)可以表示为^[15]

$$R_{ij} = CV[(x_i - x_j)/\lambda] + aCV[(x_i + x_j)/\lambda] \quad (1)$$

式中: λ 为电磁波的波长; a 为接收天线的极化因子,当接收天线的极化方向为水平极化时, $a=1$,当接收天线的极化方向为垂直极化时, $a=-1$;CV为余弦可见度。

CV与场景亮温之间是一对余弦变换对的关系^[13]:

$$CV(u) = 2 \int_0^1 T(\xi) \cos(2\pi u \xi) d\xi \quad (2)$$

式中: u 为空间频率; ξ 为方向余弦, $\xi = \sin \theta$; $T(\xi)$ 为修正单位立体角内的接收亮温。

考虑阵列中所有的双天线,其互相关均可以得到关系式(1),将所有的关系式组合,可以得到转移方程^[13]:

$$R = P \cdot CV \quad (3)$$

式中: R 为所有双天线互相关组合成的向量; P 为转移方程; CV 为所有余弦可见度组合成的向量。

求解该转移方程获得余弦可见度后,即可使用反余弦变换重建场景亮温分布^[13]。

1.1 近场条件下的双天线互相关

当成像目标位于接收天线阵列的近场区域时,成像目标到天线*i*和天线*j*、镜像天线 i_i 和 j_j 的路径不再互相平行,此时1D-MAS的原理如图2所示。

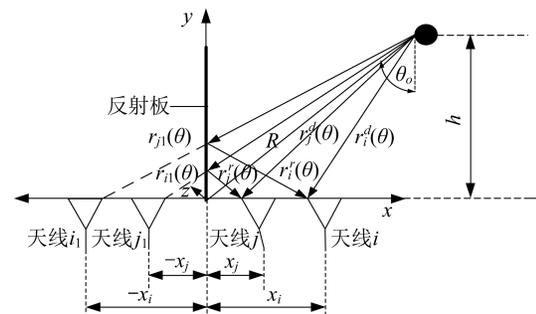


图2 近场条件下1D-MAS的原理

Fig. 2 Schematic diagram of the 1D-MAS principle under near-field conditions

如图2所示,成像目标到天线阵列平面的距离为 h ,到坐标原点之间的距离为 R_0 ,相对于原点的入射角为 θ_0 ,成像目标的坐标记作 (x_s, h) 。此时成像目标到天线 i_j 、 i_i 、 j_j 的波程为

$$r_i(\theta_0) = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + h^2} = \sqrt{R_0^2 + x_i^2 - 2x_s x_i}$$

$$\begin{aligned} r_j(\theta_o) &= \sqrt{(x_j - x_o)^2 + h^2} = \sqrt{R_o^2 + x_j^2 - 2x_o x_j} \\ r_{i1}(\theta_o) &= \sqrt{(-x_i - x_o)^2 + h^2} = \sqrt{R_o^2 + x_i^2 + 2x_o x_i} \\ r_{j1}(\theta_o) &= \sqrt{(-x_j - x_o)^2 + h^2} = \sqrt{R_o^2 + x_j^2 + 2x_o x_j} \quad (4) \end{aligned}$$

根据镜像几何关系, $r_{i1}(\theta_o)$ 、 $r_{j1}(\theta_o)$ 也是反射信号的波程, 即 $r_i^r(\theta_o) = r_{i1}(\theta_o)$, $r_j^r(\theta_o) = r_{j1}(\theta_o)$, 代入这两个关系式后, 对式(4)进行一阶泰勒近似有^[16]

$$\begin{aligned} r_i(\theta_o) &\approx R_o + \frac{x_i^2}{2R} - x_i \sin \theta_o \\ r_j(\theta_o) &\approx R_o + \frac{x_j^2}{2R} - x_j \sin \theta_o \\ r_i^r(\theta_o) &\approx R_o + \frac{x_i^2}{2R} + x_i \sin \theta_o \\ r_j^r(\theta_o) &\approx R_o + \frac{x_j^2}{2R} + x_j \sin \theta_o \quad (5) \end{aligned}$$

而 1D-MAS 的双天线互相关可以表示为^[13]

$$\begin{aligned} R_{ij} &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta_o) \exp\{-jk(r_j - r_i)\} d\theta_o + \\ & a \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta_o) \exp\{-jk(r_j^r - r_i)\} d\theta_o + \\ & a \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta_o) \exp\{-jk(r_j - r_i^r)\} d\theta_o + \\ & \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta_o) \exp\{-jk(r_j^r - r_i^r)\} d\theta_o \quad (6) \end{aligned}$$

式中: k 为电磁波的波数, $k = 2\pi/\lambda$; $T_n(\cdot)$ 为单位立体角内的接收亮温。

将式(5)代入式(6), 可以获得近场条件下的双天线互相关(简称“近场双天线互相关”):

$$\begin{aligned} R_{ij} &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta_o) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left[\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o} - (x_j - x_i) \sin \theta_o\right]\right\} d\theta_o + \\ & a \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta_o) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left[\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o} + (x_j + x_i) \sin \theta_o\right]\right\} d\theta_o + \\ & a \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta_o) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left[\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o} - (x_j - x_i) \sin \theta_o\right]\right\} d\theta_o + \\ & \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta_o) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left[\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o} - (x_j - x_i) \sin \theta_o + (x_j - x_i) \sin \theta_c\right]\right\} d\theta_o \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o} + (x_j - x_i) \sin \theta_o \right\} d\theta_o = \\ & \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x_j^2 - x_i^2}{2R} R_o\right) \cdot \\ & \left\{ CV \left[\frac{x_i - x_j}{\lambda} \right] + a CV \left[\frac{x_i + x_j}{\lambda} \right] \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

对比式(1)和式(7), 近场双天线互相关可以表示为远场双天线互相关与近场相位因子 $\exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o}\right)$ 的乘积, 该相位因子的模值为 1, 相位与接收天线和成像目标的位置有关。当 $R_o \gg x_j^2 - x_i^2$ 成立时, 近场相位因子 $\exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o}\right) \approx 1$, 近场双天线互相关退化为远场双天线互相关, 可以直接使用文献[13]的方法进行亮温重建; 当 $R_o \gg x_j^2 - x_i^2$ 不成立时, 近场相位因子的影响不能被忽略, 需要校正相位因子后才能使用文献[13]的方法进行亮温重建。

1.2 基于辅助点源的近场相位校正方法

为了获取近场相位因子的相关信息, 可以利用综合孔径的方法对位于近场的已知点源进行测量, 获取综合孔径双天线互相关。根据综合孔径双天线互相关与近场相位因子的关系, 可以对近场双天线互相关进行近场相位校正。

考虑一个位于 θ_c 处的点源(校正源), 天线 i 和天线 j 的综合孔径双天线互相关为

$$\begin{aligned} R_{ij}^c &= T_n^c(\theta_c) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left[\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o^c} - (x_j - x_i) \sin \theta_c\right]\right\} \quad (8) \end{aligned}$$

式中: $T_n^c(\theta_c)$ 为尾单位立体角内的接收亮温; R_o^c 为点源到原点的距离。

将式(8)与式(7)相除, 得到校正后的近场双天线互相关:

$$\begin{aligned} R_{ij}^o &= \frac{R_{ij}}{R_{ij}^c} = \\ & \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{T_n(\theta)}{T_n^c(\theta_c)} \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o} - \left[\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o^c} - (x_j - x_i) \sin \theta + (x_j - x_i) \sin \theta_c\right]\right)\right\} d\theta + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& a \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{T_n(\theta)}{T_n^c(\theta_c)} \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o} - \right. \right. \\
& \left. \left. \left[\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o^c} + (x_j + x_i) \sin \theta + (x_j - x_i) \sin \theta_c \right] \right\} d\theta + \\
& a \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{T_n(\theta)}{T_n^c(\theta_c)} \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o} - \right. \right. \\
& \left. \left. \left[\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o^c} - (x_j + x_i) \sin \theta + (x_j - x_i) \sin \theta_c \right] \right\} d\theta + \\
& \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{T_n(\theta)}{T_n^c(\theta_c)} \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o} - \right. \right. \\
& \left. \left. \left[\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o^c} + (x_j - x_i) \sin \theta + (x_j - x_i) \sin \theta_c \right] \right\} d\theta \quad (9)
\end{aligned}$$

在近场条件下, $\frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o} - \frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o^c} \approx 0$, 而且点源的接收亮温项可以在后续的定标中消除, 因此公式(9)可以简化为

$$\begin{aligned}
R_{ij}^o &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} - (x_j - x_i) \sin \theta + \right. \\
& \left. (x_j - x_i) \sin \theta_c \right\} d\theta + \\
& a \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} (x_j + x_i) \sin \theta + \right. \\
& \left. (x_j - x_i) \sin \theta_c \right\} d\theta + \\
& a \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} - (x_j - x_i) \sin \theta + \right. \\
& \left. (x_j - x_i) \sin \theta_c \right\} d\theta + \\
& \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} (x_j - x_i) \sin \theta + \right. \\
& \left. (x_j - x_i) \sin \theta_c \right\} d\theta \quad (10)
\end{aligned}$$

此时近场相位因子 $\exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x_j^2 - x_i^2}{2R_o} \right\}$ 已经被校正, 但是引入了新的点源方位因子 $\exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (x_j - x_i) \sin \theta_c \right]$, 为了进一步校正这个方位因子, 提出了2种方法。

1.2.1 基于特定位置的单点源相位校正方法

注意到当校正源的入射角 $\theta_c = 0$ 时, 式(10)的方位因子等于0, 即

$$R_{ij}^o = \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} - (x_j - x_i) \sin \theta \right\} d\theta +$$

$$\begin{aligned}
& a \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} (x_j + x_i) \sin \theta \right\} d\theta + \\
& a \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} - (x_j + x_i) \sin \theta \right\} d\theta + \\
& \int_0^{\frac{\pi}{2}} T_n(\theta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} (x_j - x_i) \sin \theta \right\} d\theta = \\
& CV \left[\frac{x_i - x_j}{\lambda} \right] + a CV \left[\frac{x_i + x_j}{\lambda} \right] \quad (11)
\end{aligned}$$

比较式(11)和式(1), 此时近场双天线互相关的表达式与远场双天线互相关的表达式一致, 可以使用反余弦变换进行亮温重建。

上述的相位校正方法被称为基于特定位置的单点源相位校正方法(简称“单点源相位校正法”)。综合孔径的近场相位校正方法只需要校正源位于成像平面内^[14], 但是单点源相位校正法除了需要满足校正源必须位于成像平面内以外, 入射角还要为0。当这两个条件不成立时, 单点源相位校正法便不再适用。

1.2.2 近/远场点源组合测量的相位校正方法

单点源相位校正法对校正源距离和方位都提出了较高的要求, 在实际应用中可能难以实现, 为了解决该问题, 进一步提出了近/远场点源组合测量的相位校正方法(后文简称组合相位校正法)。该方法使用近场点源对近场相位因子进行校正, 随后使用远场点源对点源方位因子进行校正。

设点源1(校正源1)位于近场成像目标所在的平面内, 且该校正源的入射角 $\theta_c \neq 0$, 使用校正源1进行第一次相位校正, 得到一次校正后的近场双天线互相关为

$$\begin{aligned}
R_{ij}^{o1} &= \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (x_j - x_i) \sin \theta_c \right] \cdot \\
& \left\{ CV \left[\frac{x_i - x_j}{\lambda} \right] + a CV \left[\frac{x_i + x_j}{\lambda} \right] \right\} \quad (12)
\end{aligned}$$

为了校正式(12)中的方位因子 $\exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (x_j - x_i) \sin \theta_c \right]$, 使用一个位于远场, 且入射角为 θ_c 的校正源2, 使用综合孔径对点源2进行测量, 得到的双天线互相关为

$$R_{ij}^{c2} = T_n^c(\theta_c) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} [-(x_j - x_i) \sin \theta_c] \right\} \quad (13)$$

用式(12)除以式(13), 得到2次校正后的近场双天线互相关为

$$R_{ij}^a = \frac{R_{ij}^{c1}}{R_{ij}^{c2}} = CV \left[\frac{x_i - x_j}{\lambda} \right] + aCV \left[\frac{x_i + x_j}{\lambda} \right] \quad (14)$$

对比式(1),可知此时近场双天线互相关的表达式与远场双天线互相关的表达式相同,即校正了近场条件的影响,可以使用反余弦变换进行图像重建。与单点源相位校正法相比,组合相位校正法虽然不要求校正源的入射角必须为0,但是该方法多引入了一个校正源,同时两个校正源的入射角需保持一致。

2 仿真结果

2.1 仿真模型

天线阵列的排布方式如图3所示,本次仿真的是8单元1D-MAS,仿真采用等间距天线排布,相邻天线之间的距离为 $du = 3.5\lambda$,单元天线到反射板的最近距离为 $h = 0.5du$ 。仿真波长为 $\lambda = 5.81 \text{ mm}$ 。该仿真天线阵列可以获得 $8 \times 7 \div 2 = 28$ 组双天线互相关。

仿真过程中,需要根据天线阵列的近远场条件来设置成像目标与天线阵列之间的距离,天线阵列

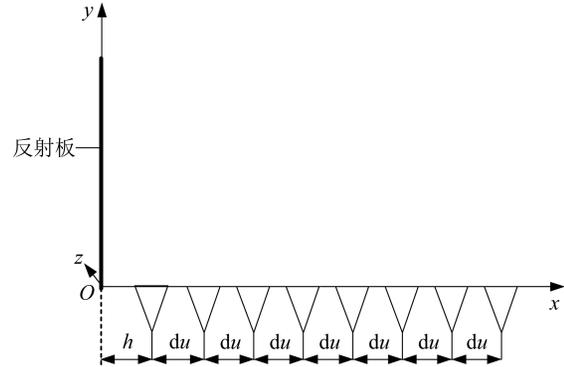


图3 仿真中天线阵列的排布方式

Fig. 3 Arrangement of the antenna array in simulation

的近远场条件通常定义为^[17-19]

$$\begin{cases} R_{n1} \geq 2 \frac{D_s^2}{\lambda}, \text{一般远场} \\ R_{n2} \geq 20 \frac{D_s^2}{\lambda}, \text{绝对远场} \end{cases} \quad (15)$$

式中: D_s 为天线阵列的尺寸。

根据上述的定义可知,仿真的一般远场为 $R_{n1} \geq 6.97 \text{ m}$,绝对远场为 $R_{n2} \geq 69.70 \text{ m}$ 。根据目标到阵列的距离,仿真一共考虑以下4种情形,见表1。

表1 仿真中目标的距离参数

Tab. 1 Distance parameters of targets in simulation

目标所处的区域类型	极近场($r < 0.1R_{n1}$)	一般近场($0.1R_{n1} \leq r < R_{n1}$)	一般远场($R_{n1} \leq r < R_{n2}$)	绝对远场($r > R_{n2}$)
成像目标与天线阵列的距离/m	0.5	4.0	20.0	80.0

为了衡量校正效果,定义亮温重建误差 R_{RMSE} ,其等于近场重建亮温 $\hat{T}(x_k)$ 与理想远场重建亮温 $T_b(x_k)$ 的均方根误差^[20]:

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M [\hat{T}(x_k) - T_b(x_k)]^2} \quad (16)$$

式中: M 为重建亮温的像素点个数。

2.2 单点源相位校正法的仿真

分别对点源目标以及展源目标进行仿真,使用单点源相位校正法对近场双天线互相关进行相位校正,对校正前后相关值的相位进行分析。在此基础上使用反余弦变换分别对校正前后的双天线互相关进行亮温重建,衡量亮温重建的误差。仿真中点源目标放置在 $\xi = 0.075$ 处,展源目标的亮温分布为凸型分布。

2.2.1 点源成像的仿真结果

校正前后近场双天线互相关的相位与远场双

天线互相关的相位的对比结果如图4所示。图4中,实线代表远场双天线互相关的相位,虚线代表校正前近场双天线互相关的相位,加号线代表校正后近场双天线互相关的相位,圆圈线代表校正后近场双天线互相关的相位与远场双天线互相关的相位之差。

点源目标的成像仿真结果如图5所示,实线代表对远场双天线互相关进行亮温重建的结果。虚线代表对校正前近场双天线互相关进行亮温重建的结果。加号线代表对校正后的双天线互相关进行亮温重建的结果。

从图中可以发现:当点源成像目标位于极近场、近场时,双天线互相关的相位与远场双天线互相关的相位差异非常大,直接进行亮温重建的误差较大;在极近场条件下,亮温重建的误差 $R_{\text{RMSE}} = 0.82 \text{ K}$;在一般近场条件下,亮温重建的误差 $R_{\text{RMSE}} = 0.64 \text{ K}$ 。在极近场以外,随着距离的慢慢增大, R_{RMSE}

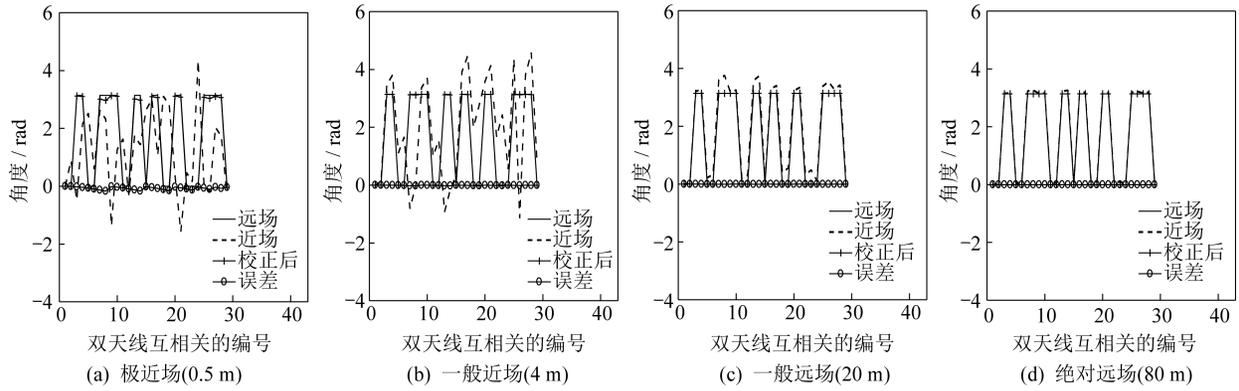


图 4 使用单点源相位校正方法前后双天线互相关的相位 (点源)

Fig. 4 Phases of the dual-antenna cross-correlation before and after using the single-point source phase correction method (point source)

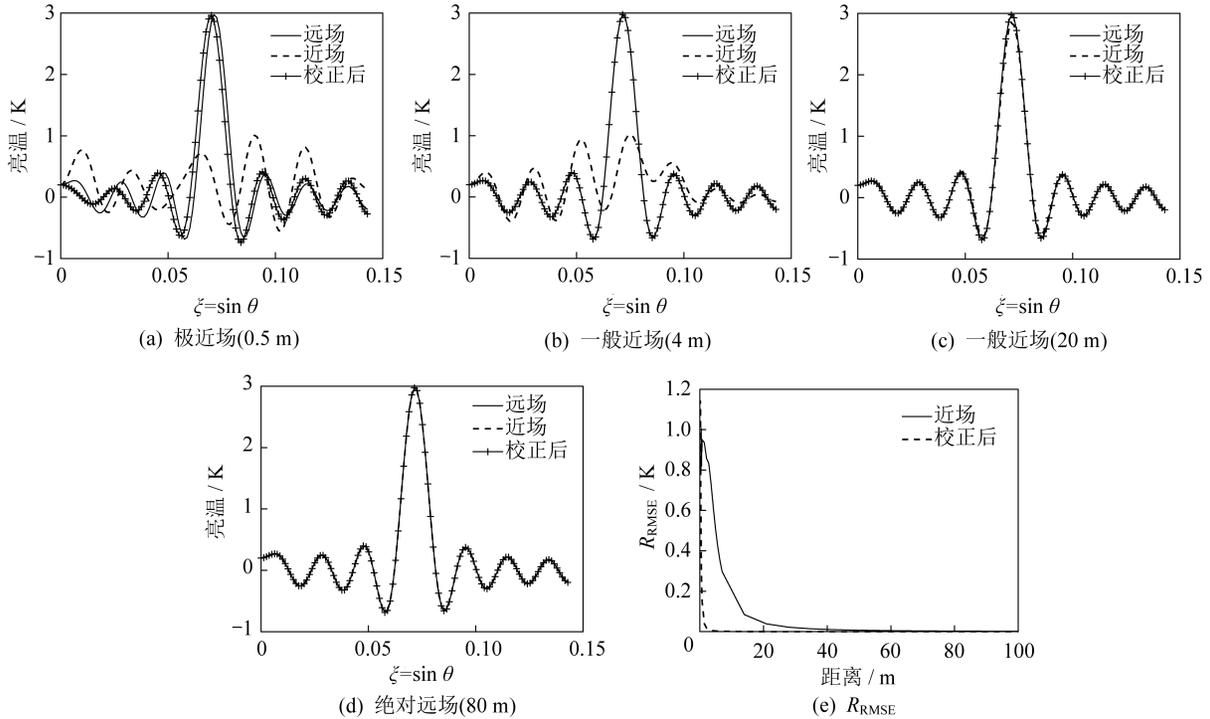


图 5 使用单点源相位校正方法的成像结果 (点源)

Fig. 5 Imaging results obtained by the single-point source phase correction method (point source)

会逐渐减少,到绝对远场后, R_{RMSE} 趋近于 0。

在一般近场、远场的条件下,进行单点源相位校正,校正后双天线互相关的相位与远场双天线互相关的相位差异非常小,因此近场相位校正后的成像效果也较好,对应的重建亮温误差也较小;在一般近场条件下, $R_{RMSE}=0.004$ K,在一般远场的情况下, $R_{RMSE}=1.9 \times 10^{-4}$ K。

在极近场条件下,使用单点源相位校正法后,成像结果仍存在有一定的误差,此时, $R_{RMSE}=0.26$ K。但是在该区域内,相较于校正前,校正后的

R_{RMSE} 有了明显的降低。

2.2.2 展源成像的仿真结果

校正前后近场双天线互相关的相位与远场双天线互相关的相位的对比结果如图 6 所示。

图 6 中,实线代表远场双天线互相关的相位,虚线代表校正前近场双天线互相关的相位,加号线代表校正后近场双天线互相关的相位,圆圈线代表校正后近场双天线互相关的相位与远场双天线互相关的相位之差。展源目标的成像仿真结果如图 7 所示。图中,实线代表对远场双天线互相关进行亮温

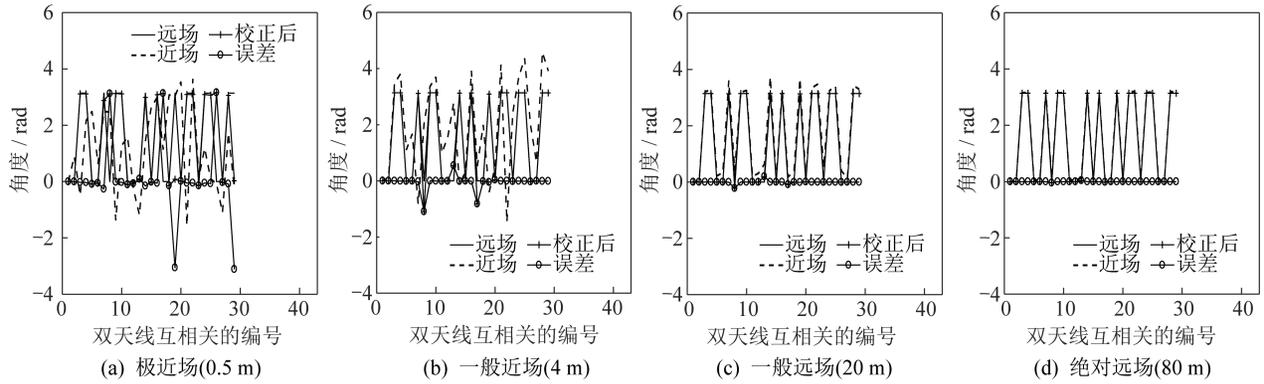


图 6 使用单点源相位校正方法前后双天线互相关的相位(展源)

Fig. 6 Phases of the dual-antenna cross-correlation before and after using the single-point source phase correction method (extended source)

重建的结果,虚线代表对校正前近场双天线互相关进行亮温重建的结果,加号线代表对校正后的双天

线互相关进行亮温重建的结果。展源成像的仿真结果与点源成像的仿真结果类似。

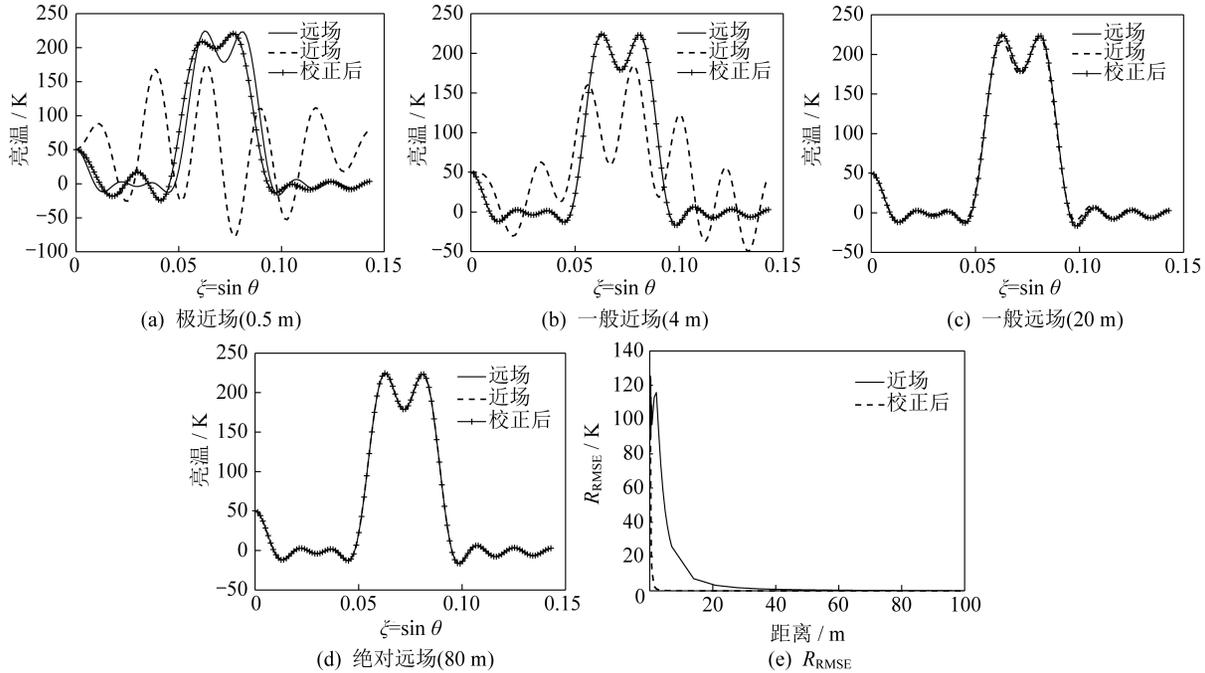


图 7 使用单点源相位校正方法的成像结果(展源)

Fig. 7 Imaging results obtained by the single-point source phase correction method (extended source)

可以发现,当展源成像目标位于极近场、近场时,双天线互相关的相位与远场双天线互相关的相位差异非常大,直接进行亮温重建的误差较大,在极近场条件下亮温重建的 $R_{\text{RMSE}}=102$ K,在一般近场条件下亮温重建的 $R_{\text{RMSE}}=64$ K。在极近场以外,随着距离逐渐增大, R_{RMSE} 会逐渐减少,到绝对远场后, R_{RMSE} 趋近于 0。

在一般近场、远场的条件下,进行单点源相位校正,校正后双天线互相关的相位与远场双天线互相关的相位差异非常小,因此近场相位校正后的成像效果也较好,对应的 R_{RMSE} 也较小:在一般近场条件下

$R_{\text{RMSE}}=0.30$ K,在一般远场的情况下 $R_{\text{RMSE}}=0.01$ K。

在极近场条件下,使用单点源相位校正法后,成像的结果仍存在有一定的误差,此时 $R_{\text{RMSE}}=22.3$ K。但是在该区域内,相较于校正前,校正后的 R_{RMSE} 有明显的降低。

2.3 组合相位校正法的仿真

分别对点源目标以及展源目标进行仿真,使用组合相位校正法对近场双天线互相关进行相位校

正,对校正前后互相关的相位进行分析。在此基础上,使用反余弦变换分别对校正前后的双天线互相关进行亮温重建,衡量亮温重建的误差。成像目标的相关设置与单点源相位校正法仿真中的设置一致。2个校正源的入射方位角均为 $\theta_c = 30^\circ$ 。

2.3.1 点源成像的仿真结果

校正前后近场双天线互相关的相位与远场双天线互相关的相位的对比结果如图8所示,图中各个线型的含义与图4中一致。点源目标的成像仿真结果如图9所示,图中各个线型的含义与图5中一致。

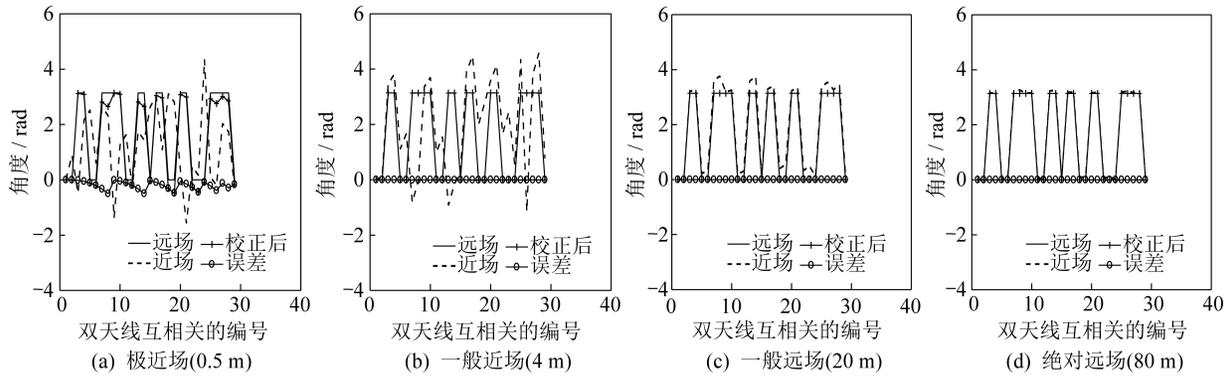


图8 使用组合相位校正方法前后双天线互相关的相位(点源)

Fig. 8 Phases of the dual-antenna cross-correlation before and after using the combined phase correction method (point-source)

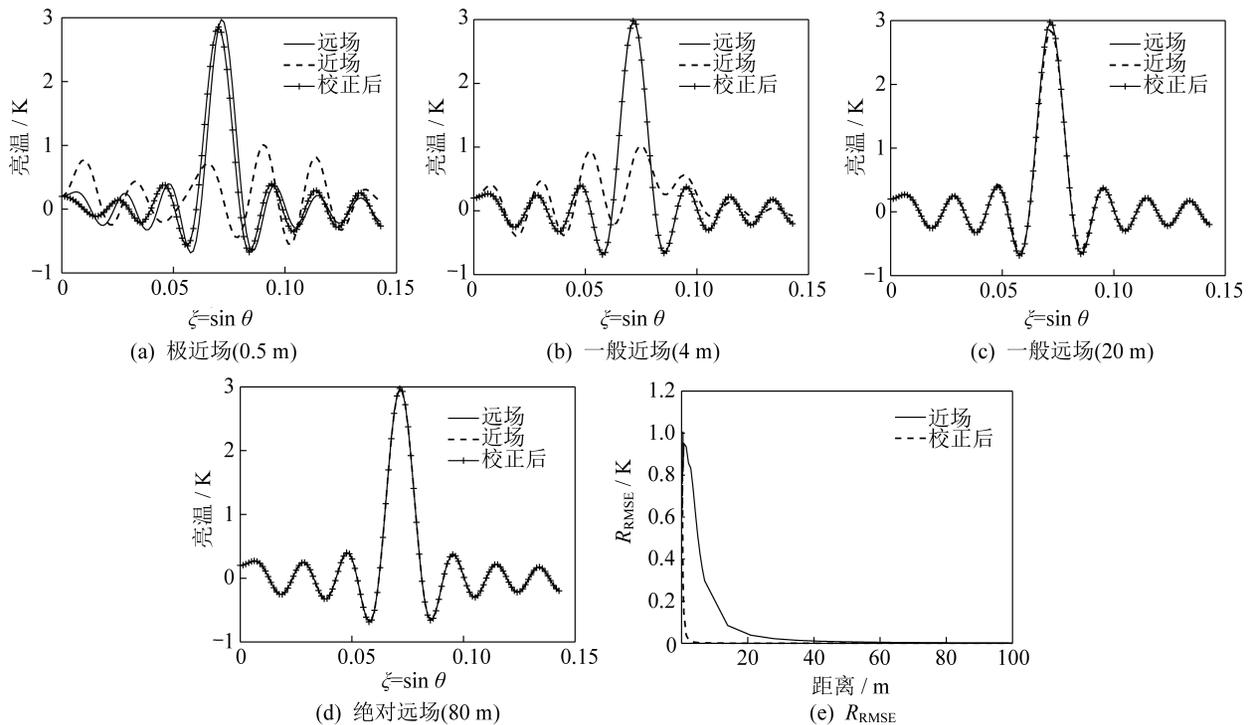


图9 使用组合相位校正方法的成像结果(点源)

Fig. 9 Imaging results obtained by the combined phase correction method (point source)

在一般近场、远场的条件下,进行组合相位校正,校正后近场双天线互相关的相位与远场双天线互相关的相位差异非常小,因此近场相位校正后的成像效果也较好,对应的 R_{RMSE} 也较小:在一般近场条件下 $R_{RMSE} = 0.0040\text{ K}$,在一般远场的情况下

$R_{RMSE} = 0.0016\text{ K}$ 。

在极近场条件下,使用组合相位校正法进行校正后,近场的成像效果仍然存在一定的误差,此时 $R_{RMSE} = 0.250\text{ K}$ 。但是在该区域内,相较于校正前,校正后的 R_{RMSE} 有了明显的降低。

2.3.2 展源成像的仿真结果

校正前后近场双天线互相关的相位与远场双天线互相关的相位的对比结果如图 10 所示。图中

各个线型的含义与图 6 中一致。展源目标的成像仿真结果如图 11 所示, 图中的各个线型与图 7 中一致。

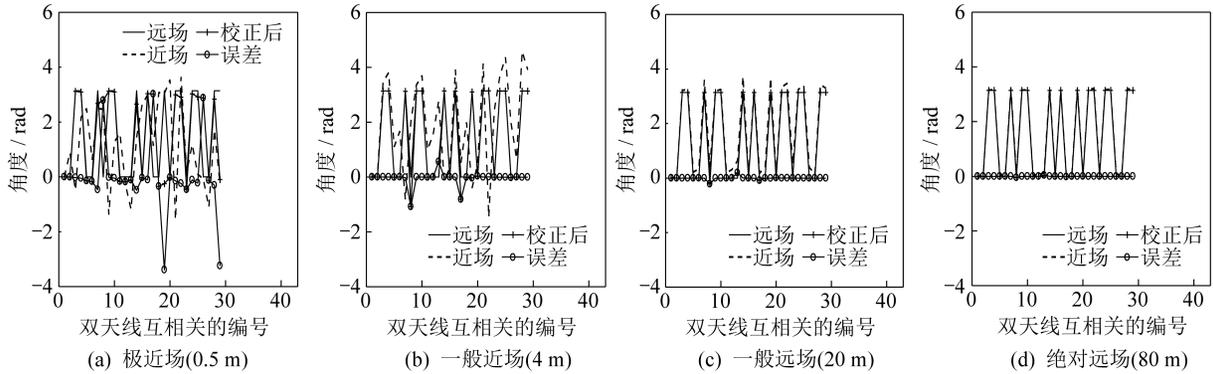


图 10 使用组合相位校正方法前后双天线互相关的相位

Fig. 10 Phases of the dual-antenna cross-correlation before and after using the combined phase correction method

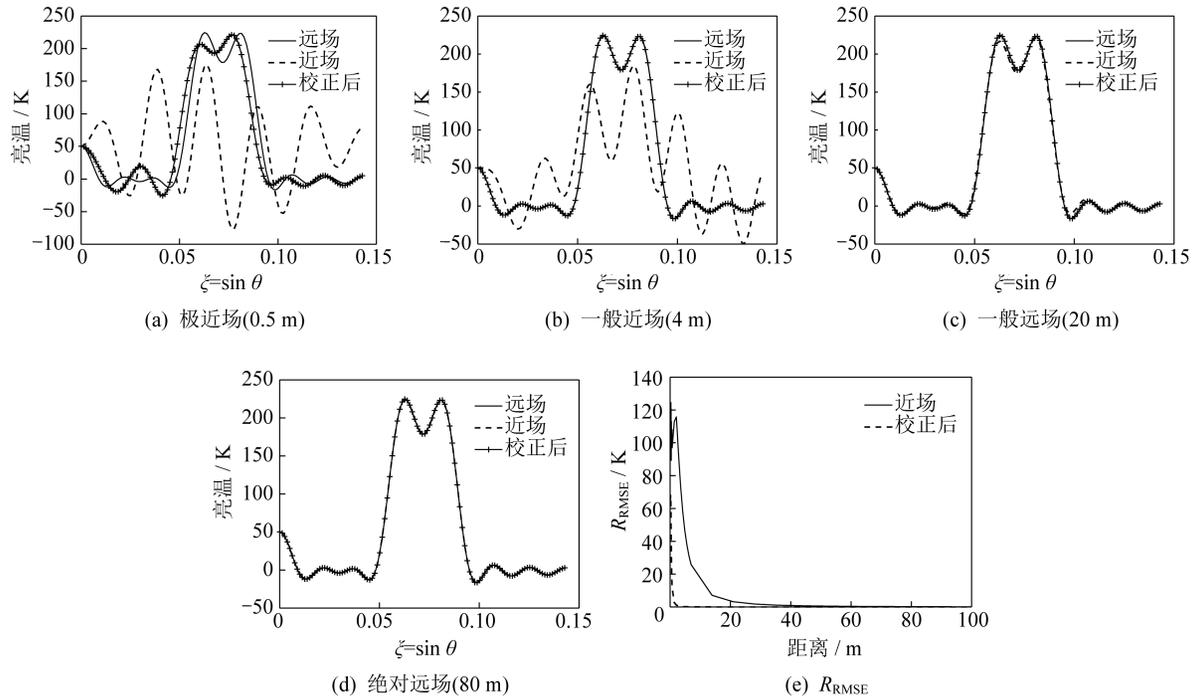


图 11 使用组合相位校正方法的成像结果(展源)

Fig. 11 Imaging results obtained by the combined phase correction method (extended source)

在一般近场、远场的条件下,进行组合相位校正,校正后近场双天线互相关的相位与远场双天线互相关的相位差异非常小,因此近场相位校正后的成像效果也较好,对应的 R_{RMSE} 也较小:在一般近场条件下 $R_{\text{RMSE}}=0.30 \text{ K}$,在一般远场的情况下 $R_{\text{RMSE}}=0.01 \text{ K}$ 。

在极近场条件下,使用组合相位校正法后,近场的成像效果仍存在一定的误差,此时 $R_{\text{RMSE}}=22.3 \text{ K}$ 。但是在该区域内,相较于校正前,校正后的 R_{RMSE} 有明显的降低。

3 结束语

为了研究 MAS 的近场成像,本文推导了近场条件下 1D-MAS 的双天线互相关表达式,建立了近场双天线互相关与远场双天线互相关之间的联系,并提出了单点源相位校正法、组合相位校正法两种近场相位校正方法。对近场双天线互相关进行近场相位校正后,可以利用反余弦变换进行近场成像。

仿真验证了两种相位校正方法在一般近场与一般远场中应用效果较好,为1D-MAS的近场成像提供了方法,但是这两种相位校正方法在极近场中的校正效果还有待提升。因为在极近场中,使用一阶泰勒近似对成像目标到天线之间的距离进行估计并不准确,需要考虑泰勒近似的高阶项。

从本文的结果来看,未来1D-MAS近场成像的研究可以从以下方面着手:1)极近场内,双天线互相关表达式需要进一步的推导;2)本文只进行了理论与仿真分析,未来可以进行典型辐射目标的近场成像实验。

参考文献

- [1] 施建成,刘强,刘晨洲,等.微波遥感地表参数反演进展[J].中国科学:地球科学,2012,42(6):814-842.
- [2] 刘一良.微波遥感的发展与应用[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2008,4(2):171-173.
- [3] RUF C, SWIFT C, TANNER A, et al. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 26(5): 597-611.
- [4] 吴季,刘浩,孙伟英,等.综合孔径微波辐射计的技术发展及其应用展望[J].遥感技术与应用,2005(1): 24-29.
- [5] LE VINE D, KAO M, SWIFT C, et al. Initial results in the development of a synthetic aperture microwave radiometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(4): 614-619.
- [6] MARTIN M, MENARD Y, GOUTOULE J, et al. MIRAS, a two-dimensional aperture synthesis radiometer [C]// Proceedings of IGARSS '94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena, CA, USA: IEEE Press, 1994: 1323-1325.
- [7] 陈之薇,李青侠,李炎.SMOS与Aquarius卫星海表盐度测量方法及数据的对比分析[J].上海航天,2018,35(2):37-48
- [8] LAMBRIGSTEN B, WILSON W, TANNER A, et al. GeoSTAR: a synthetic aperture approach for a geostationary microwave sounder [C]// 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720).Honolulu, USA: IEEE Press, 2004: 1008-1014.
- [9] LE VINE D, J-JACKSON T, HAKEN M. Initial images of the synthetic aperture radiometer 2D-STAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007,45(11): 3623-3632.
- [10] LI Q, HU F, GUO W, et al. A general platform for millimeter wave synthetic aperture radiometers [C]// IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston, MA, USA: IEEE Press, 2008: 1156-1159.
- [11] XUE Y, MIAO J, WAN G, et al. Development of the disk antenna array aperture synthesis millimeter wave radiometer [C]// 2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Nanjing, China: IEEE Press, 2008: 806-809.
- [12] CHEN L, ZHANG X. Two-dimensional mirrored interferometric aperture synthesis [C]// International Symposium on Antennas. Xi'an, China: IEEE Press, 2012: 482-485.
- [13] CHEN L, LI Q, YI G, et al. One-dimensional mirrored interferometric aperture synthesis: performances, simulation, and experiments [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2013, 51(5): 2960-2968.
- [14] TANNER A, LAMBRIGSTEN B, GAIER T, et al. Near field characterization of the GeoSTAR demonstrator [C]// 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. Denver, CO, USA: IEEE Press, 2006: 2529-2532.
- [15] LEI Z, CHEN K, LI Q, et al. Rank-full arrays for 1-d mirrored aperture synthesis [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 19(4): 1-5.
- [16] 杨弢亮,叶彦谦.微积分学教程[M].8版.北京:高等教育出版社,2006:205-221.
- [17] LAURSEN B, SKOU N. Synthetic aperture radiometry evaluated by a two-channel demonstration model [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 822-832.
- [18] 张成,吴季,刘浩,等.综合孔径微波辐射计近场成像方法[J].中国科学:技术科学,2011,41(9):1225-1233.
- [19] SALMON A. Near-field aperture synthesis millimeter wave imaging for security screening of personnel [C]// 2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP). Manchester, UK: IEEE Press, 2014: 1082-1085.
- [20] DOU H, CHEN K, LI Q, et al. Analysis and correction of the rank-deficient error for 2-d mirrored aperture synthesis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 59(7): 2222-2230.