

近程毫米波合成孔径辐射计被动测距原理

王本庆, 李兴国

(南京理工大学电光学院毫米波光波近感技术研究所, 南京 210094)

[摘要] 毫米波合成孔径技术利用了物体自身辐射电磁波的相位信息, 采用很少阵元就能实现实时成像, 但目前合成孔径技术只是限于亮温成像, 缺少了目标的距离信息, 这对于目标探测与识别很不利。提出在近程条件下合成孔径被动测距原理和相应的双正交傅立叶变换算法, 并给出了近程距离分辨率公式, 近程成像的特点是成像公式中存在二次相位因子, 而且距离分辨率和距离的平方成反比。毫米波合成孔径被动成像可以同时得到物体辐射的亮温分布和距离分布, 能够有效克服离焦引起的图像模糊, 对图像的反降晰和目标识别具有重要意义。

[关键词] 毫米波辐射计; 合成孔径; 近程成像; 被动测距; BFT

[中图分类号] TN911.72 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)03-0095-05

1 前言

国内外虽然对毫米波合成孔径辐射计被动成像技术作了大量研究^[1~3], 但这种遥感式辐射计并不适合对近程目标成像。近程毫米波成像技术用来对几米至几十米范围内的目标进行探测和识别, 具有很高的实用价值^[4], 例如, 医疗上可以通过成像检测患者的病灶部位, 安检部门可以探测隐藏的枪支等危险目标。近几年, 近程毫米波合成孔径成像技术也得到较大发展, 日本 NEC 公司和澳大利亚 CSIRO 的 ICT 中心已经有成像样机的报道^[5, 6]。但现有毫米波成像系统都是对目标场景成亮温像, 缺少目标的距离信息, 对目标的探测和识别很不利。合成孔径技术利用了电磁波的相位信息, 在近程条件下可以通过计算波前曲率得到目标的距离信息。文章在分析合成孔径辐射计近程成像原理的基础上给出了合成孔径辐射计针对点源的被动测距原理和相应的双正交傅立叶变换算法。

2 近程毫米波合成孔径成像原理

毫米波辐射计合成孔径技术理论基础是准单色扩展源的部分相干理论, 互相关函数是部分相干理

论的基本物理量, van Cittert - Zernike 定理指出互相关函数是辐射源归一化亮温分布的傅立叶变换。

文章所讨论的近程是指天线的 Fresnel 区, 即要求成像距离 R 远远大于波长, 并且满足条件^[7]:

$$R < 2D^2/\lambda \quad (1)$$

其中 D 为合成孔径, 通常近程成像都在这个范围内。

设有一稳定辐射源 L , 其归一化辐射强度为 $I(x)$, 中心波长为 λ 。在距辐射源 R 处有两个接收天线, 相距为 d 。现把 L 离散化为 M 小段, 其中的每一小段满足其线度远小于波长, 第 m 小段 ΔL_m 辐射的电磁波到达两个天线的距离分别为 R_1 和 R_2 , 其辐射的电磁波表示为

$$E_m = A_m \exp[-i(\omega t - Kr)] \quad (2)$$

式(2)中, ω 为(时间)频率, $K = 2\pi/\lambda$ 为空间频率, r 为距离, A_m 为包络, 不随时间变化。则两天线接收到 ΔL_m 的信号分别为

$$E_{m1} = \frac{1}{R_1} A_m \exp[-i(\omega t - KR_1)]$$

$$E_{m2} = \frac{1}{R_2} A_m \exp[-i(\omega t - KR_2)] \quad (3)$$

对于 L 上所有线元, 不考虑天线的方向性, 两个天线的总接收分别为

[收稿日期] 2009-04-30; 修回日期 2009-10-20

[作者简介] 李兴国(1940-), 男, 云南嵩明县人, 南京理工大学教授, 博士生导师, 研究方向为毫米波探测技术; E-mail: li-xg2004@163.com

$$E_1 = \sum_m E_{m1}, E_2 = \sum_m E_{m2} \quad (4)$$

现定义两个天线接收信号的互强度为

$$\begin{aligned} J_{12} &= \langle E_1 E_2^* \rangle = \langle \sum_m E_{m1} \sum_n E_{n2}^* \rangle \\ &= \sum_{m=n} \langle E_{m1} E_{n2}^* \rangle + \sum_{m \neq n} \langle E_{m1} E_{n2}^* \rangle \\ &= \sum_{m=n} \langle E_{m1} E_{n2}^* \rangle = \sum_m \langle E_{m1} E_{m2}^* \rangle \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中 $\langle \cdot \rangle$ 表示平均,式(5)中利用了不同源的辐射的电磁波不相干的性质,也就是部分相干原理,也是毫米波合成孔径被动成像的理论基础。把式(3)代入式(5)可得:

$$\begin{aligned} J_{12} &= \sum_m \langle \frac{1}{R_1} A_m \exp[-i(\omega t - KR_1)] \\ &\quad \times \frac{1}{R_2} A_m^* \exp[i(\omega t - KR_2)] \rangle \\ &= \sum_m \langle A_m A_m^* \rangle \frac{\exp[iK(R_1 - R_2)]}{R_1 R_2} \\ &= \sum_m \bar{I}_m \frac{\exp[iK(R_1 - R_2)]}{R_1 R_2} \Delta L_m \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中 $\bar{I}_m = \lim_{\Delta L_m \rightarrow 0} \frac{\langle A_m(t) \cdot A_m^*(t) \rangle}{\Delta L_m}$ 为 ΔL_m 的辐射强度,正比于所求的亮温。当 $\Delta L_m \rightarrow 0$ 时, x 和 m 表示等价。所以有:

$$J_{12} = \int_L \bar{I}(x) \frac{\exp[iK(R_1 - R_2)]}{R_1 R_2} dx \quad (7)$$

把式(7)换成直角坐标系表示,设两天线的坐标为 x_1, x_2 , 不失一般性,设 $x_1 = 0$, 则 $x_2 = d$, 可知有以下关系:

$$R_1 = \sqrt{x^2 + R^2}, R_2 = \sqrt{(x-d)^2 + R^2} \quad (8)$$

通过傍轴条件,由二阶 Taylor 展开得:

$$R_1 = R + \frac{x^2}{2R}, R_2 = R + \frac{(x-d)^2}{2R} \quad (9)$$

则有:

$$K(R_1 - R_2) = 2\pi vx - \varphi \quad (10)$$

式(10)中令 $v = d/\lambda R$, $\varphi = \pi \lambda R v^2$, 所以:

$$J_{12} = e^{-i\varphi} \int_L \bar{I}(x) \frac{\exp(i2\pi vx)}{R_1 R_2} dx \quad (11)$$

又定义自强度为

$$J_{11} = \int_L \frac{\bar{I}(x)}{R_1^2} dx, J_{22} = \int_L \frac{\bar{I}(x)}{R_2^2} dx \quad (12)$$

由此定义归一化互相关函数为

$$\mu_{12} = \frac{J_{12}}{\sqrt{J_{11} J_{22}}} = e^{-i\varphi} \int_L I(x) \exp(i2\pi vx) dx \quad (13)$$

式(13)中令 $I(x) = \frac{\bar{I}(x)}{\int_L \bar{I}(x) dx}$ 为归一化亮温分布。

综上所述可得

$$\mu(v) = e^{-i\varphi} \int_L I(x) \exp(i2\pi vx) dx \quad (14)$$

式(14)说明互相关函数是亮温分布的逆傅立叶变换和二次相位因子的积,对式(14)作傅立叶变换就可得到所要的场景辐射强度图像:

$$I(x) = FT[e^{i\varphi} \mu(v)] \quad (15)$$

式(15)即为近程毫米波合成孔径亮温成像公式。

近程合成孔径成像的主要特点是有二次相位补偿因子 $e^{i\varphi}$, 这是由于近程条件下波前为球面波造成的,也是近程成像的关键,如果没有这一项,会使近程脉冲响应变宽,幅值变低,如图1(a)所示,而且距离越近越严重。二次相位因子的作用就是消除二次相的影响,压缩脉冲响应,如图1(b)所示。

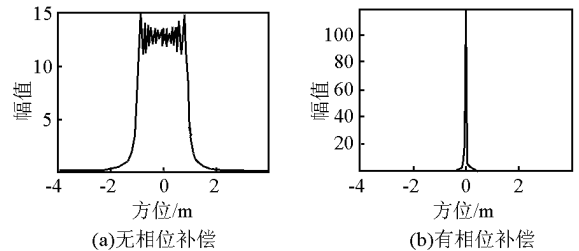


图1 点源的近程合成孔径成一维像

Fig. 1 Near range synthetic aperture images of point target

在毫米波合成孔径近程成像中,如果距离 R 已知,则可以计算相应的二次相位因子,代入成像公式,得到清晰的辐射像。但在某些情况下,如毫米波合成孔径未制导,目标距离未知,则要首先判断目标距离,然后再成像。图2为毫米波合成孔径成像系统对单辐射源所成的一维像。从图2可以看出,原始一维像的峰值较宽,噪声过大。通过相位补偿后,明显地提高了毫米波合成孔径一维像的定位精度和

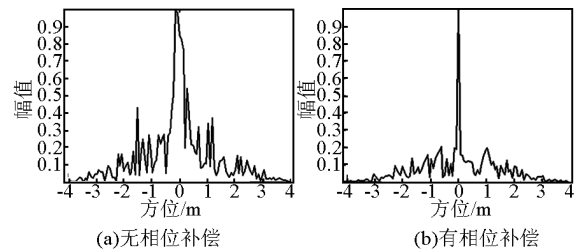


图2 近程毫米波合成孔径的单源一维像

Fig. 2 Near range MMW (millimeter wave) synthetic aperture images

信噪比,极大地改善了成像系统的性能。

3 近程合成孔径被动测距原理

被动成像一般是没有距离信息的,有的可以采用目标强度对比来判定目标的距离^[6],但是要假定目标的辐射强度是相同或已知的,并且这种方法受噪声环境影响较大;还有根据极化差异来获得距离信息^[8],此外还可以通过几何关系确定距离,但是只能用来定距,缺少灵活性。

在近程条件下,因为辐射源的波前为球面,接收阵列天线不仅可以接收到电磁波的方位信息,还能够接收到波前的曲率信息,而波前曲率和传播距离成反比,因此就可以根据波前曲率求取目标距离。当系统接收球面波时,反映在成像公式中就是多出二次相位因子。二次相位因子可以看作是一线性调频信号(LFM),其调频斜率就是 $\pi/\lambda R$,与传播距离相对应。简而言之,被动测距原理就是求二次相位因子对应 LFM 信号的调频斜率。

从信号处理方面来讲,LFM 在雷达成像中得到广泛的应用,主要是因为可以增加信号的带宽,提高距离分辨率。同理,近程时接收到的是球面波,空间高频成分增加,从而提高了距离分辨率,而在远程时,由于波前曲率太小而近似认为平面波,只有单一的空间频率,因此没有了距离分别的能力。

从图像处理方面来讲,式(3)所求出的像 $I(x)$ 是辐射场在一定距离上的成像截面,由于这个距离和图像中的某些点的实际距离并不相符合,在这些点上产生了离焦衍射,使得所成亮温图像较原始辐射场模糊。这一特征可用点扩散函数(PSF)或点扩散图描述,图3所示为一维点扩散图,其意义是某一距离的点源采用不同的二次相位因子进行补偿时所成的像。由图3可以看出,只有在当补偿因子的

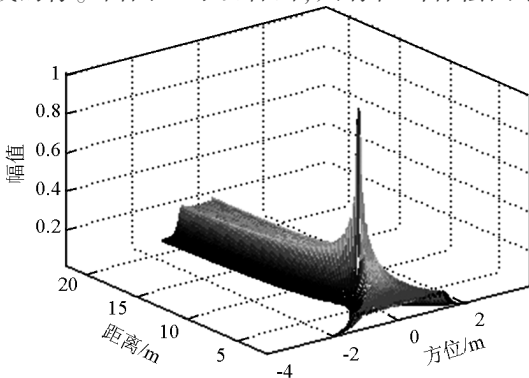


图3 合成孔径辐射计成像点扩散图

Fig. 3 Point spread map of synthetic aperture radiometer

距离等于实际距离时,才可以成最清晰的像,如图1(b)所示,当聚焦平面有偏离时,像扩散为衍射图样,形成一个弥散像,如图1(a)所示。

4 被动测距算法

毫米波合成孔径被动测距的关键是求二次相位因子对应 LFM 信号的调频斜率。在雷达信号处理中,有许多 LFM 调频斜率的估计算法,但是现有的这些算法都存在诸多不足,如搜索时间长,有交叉项等。对于点目标,提出一种高效的 LFM 调频斜率估计算法,称为双正交傅立叶变换(BFT),其特点是信号在一组 LFM 基下展开,通过变换得到信号调频斜率密度谱。该算法不需要搜索,且特别适合对不同调频斜率组成的多 LFM 信号进行调频斜率分析。BFT 和逆 BFT 定义为

$$I(k) = 2 \int_0^{+\infty} \mu(v) v \exp(-ikv^2) dv$$

$$\mu(v) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} I(k) \exp(ikv^2) dk \quad (16)$$

式(16)中自变量 k 为调频斜率, $I(k)$ 为调频斜率密度谱,通过上面的分析可知, k 和 R 的关系为

$$k = \frac{\pi}{\lambda R} \quad (17)$$

假设通过 BFT 得到调频斜率密度谱最大值对应的调频斜率估计值为 K ,则相对应的目标距离为

$$R = \frac{\pi}{\lambda K} \quad (18)$$

在近程条件下,距离测量的分辨率并不是固定的,而是和距离存在密切的关系。近程合成孔径被动测距距离分辨率 ΔR 为

$$\Delta R = 2\lambda \left(\frac{R}{D}\right)^2 \quad (19)$$

可见随着距离的增加,其分辨率成平方率下降,因此合成孔径被动测距只在近程有较理想的分辨率。

5 仿真及分析

图4为一在 6 m 处和 10 m 处的点目标,采用 BFT 算法的距离仿真输出。其中条件是:波长 $\lambda = 8$ mm,天线合成孔径 $D = 0.8$ m,天线最小间距 $\Delta d = 4$ mm。通过对比可以看出,目标在 10 m 处的距离分辨率要低,而且旁瓣增加。

近程合成孔径被动成像需要注意的另一个问题是像差。图5是把许多距离同为 6 m 但方位不同的点源所成的像经过极大值滤波后相加所得到的曲线,此时目标可以看作是辐射均匀的直线。由图5

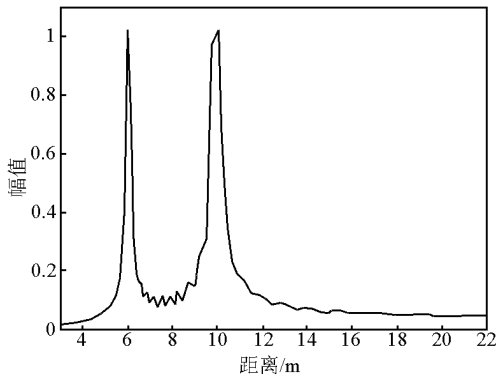


图4 目标在6 m和10 m处采用BFT算法的距离输出

Fig. 4 BFT range output with target at 6 m and 10 m

看出,合成孔径辐射计成像对距离有改变,这主要是因为近程条件下,不能较好地满足傍轴条件,实际所成像与理想像之间存在像差,这里主要为场曲和畸变。场曲像差使所成像的清晰像面不是一个平面而近似为一个抛物面,畸变像差对边缘像点有非线性压缩,所以合成孔径成像所得到的距离分布需要进行修正,这是近程合成孔径成像的又一特点。

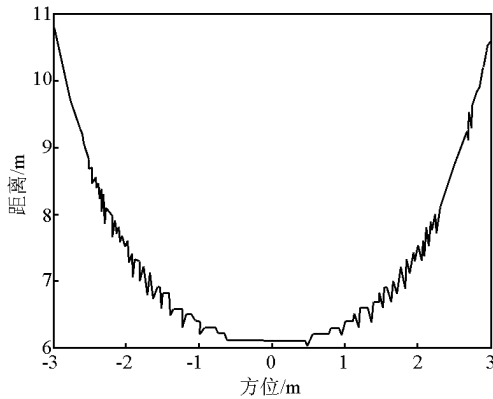


图5 目标为6 m的像差分布曲线

Fig. 5 Aberration distribution with target at 6 m

5 结语

提出近程毫米波合成孔径被动测距原理和算法,并就被动成像的相关问题做了探讨。近程毫米波合成孔径成像可以测量目标的距离,这样就可以给出实际目标的无模糊像。合成孔径辐射计成像不需要扫描,成像速度快,灵敏度高;其成像分辨率和天线个数的平方成反比,节省硬件资源和成本,因此具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 章 勇. 被动毫米波成像技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 1999
- [2] Neil A Salmon, John Beale, Andy Beard, et al. An all electronic passive millimetre wave imaging system[J]. Proc of SPIE, 2005, 5789: 11 - 15
- [3] Shao Xuanmin, William Junor, Raymond Zenick, et al. Passive interferometric millimeter - wave imaging [J]. Proc of SPIE, 2004, 5410: 270 - 277
- [4] 李兴国. 毫米波近感技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991
- [5] Hitoshi Nohmi, Seiki Ohnishi, Osamu kujubu. Passive millimeter wave camera with interfere - tric processing[J]. Proc of SPIE, 2007, 6548: 65480C, 1 - 8
- [6] Michael L Brothers, Greg P Timms, John D Bunton, et al. A 190 GHz active millimeter - wave imager [J]. Proc of SPIE, 2007, 6548: 654804, 1 - 9
- [7] 卢万铮. 天线理论与技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004
- [8] Firooz A Sadjadi. Passive 3D imaging using polarimetric diversity [J]. Proc of SPIE. 2006, 6311: 63110H, 1 - 6

Near range millimeter wave synthetic aperture radiometer passive range measurement

Wang Benqing, Li Xingguo

(Institute of Millimeter Wave and Optical Near Sensing Technology, School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

[Abstract] Millimeter wave synthetic aperture radiometer (MMW-SAR) technology will be real-time ima-

ging with less receiver elements due to use phase information of electromagnetic wave radiating from target. But MMW-SAR is limited to brightness temperature imaging nowadays, it is very unfavorable for target detection and identification lacking of target range information, thus this paper presents novel principle and BFT algorithm for MMW-SAR passive range measurement under near range conditions, and then gives the range resolution formula. The features of near range imaging are existence of quadratic phase factor in imaging formula and the range resolution is inverse proportion into the square of range. MMW-SAR passive imaging can get both range distribution and brightness temperature distribution, which could effectively overcome fuzzy problem caused by defocus.

[**Key words**] millimeter wave radiometer; synthetic aperture; near range imaging; passive range measurement; BFT

(上接 94 页)

Study on the project multiple-objectives coordination

Liu Xiaofeng^{1, 2}, Chen Tong¹, Wu Shaoyan³

(1. School of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Shandong Provincial Branch, Industrial and Commercial Bank of China, Jinan 250001, China;

3. Economic and Management School, Tianjin University of Technology, Tianjin 300301, China)

[**Abstract**] The Particle Swarm Optimization (PSO) is an evolutionary computation, which not only can search solutions randomly and fully, but also is convenient to be carried out. Hence, the article focuses on the application of PSO to the multiple-objective coordination optimization of project, looking forward to seeking best solutions easily and quickly. After introducing the basic theory of the algorithms and its several versions, the article aims at the efficiency coefficient of quality, cost, time and resource subsystem, and set up a multiple optimization coordination model. In the following part, the article introduces how to apply PSO to solve the project coordination optimization problem in detail. The numeric example followed indicates that PSO can solve the multiple-objectives coordination optimization problem of project exactly and quickly.

[**Key words**] Particle Swarm Optimization (PSO); project management; efficiency coefficient of coordination; multiple optimization coordination model; numeric example