

单频信号二维合成孔径成像算法*

张寅生¹, 杨俊刚², 安玮², 刘昆¹

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:传统合成孔径雷达采用大带宽信号实现距离向分辨,采用一维合成孔径实现方位分辨,得到二维图像。在某些近场成像场合,成像分辨率要求很高,依靠信号带宽很难达到要求。提出了一种二维合成孔径成像系统,利用二维合成孔径实现二维分辨,分辨率取决于合成孔径长度,不受信号带宽的约束,可以实现超高分辨率。信号采用简单的单频信号,可使系统大大简化。详细推导了单频信号的二维合成孔径成像算法。仿真结果表明,单频信号二维合成孔径是一种有效的高分辨率成像技术。

关键词:雷达成像;近场成像;二维合成孔径;成像算法

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号:1001-2486(2014)04-0097-05

Single frequency two-dimensional synthetic aperture imaging system and imaging algorithm

ZHANG Yinsheng¹, YANG Jungang², AN Wei², LIU Kun¹

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Traditional synthetic aperture radar uses wideband signal to achieve range resolution, and uses one-dimensional synthetic aperture to achieve azimuth resolution, thereby forming a two-dimensional image. In the cases of short range imaging, a very high imaging resolution may be required, and it is difficult to achieve such high resolution using signal bandwidth. A two-dimensional synthetic aperture imaging system is proposed; it uses the two-dimensional synthetic aperture to achieve two-dimensional resolution. The resolution depends on the length of the synthetic aperture, and it is no longer limited by the signal bandwidth and can obtain ultra-high resolution. The transmitted signal is single frequency waveform, thus the system can be very simple. The imaging algorithm for the single frequency two-dimensional synthetic aperture imaging system was derived in detail. Simulation results showed that the single frequency two-dimensional synthetic aperture imaging system is an effective technique for high resolution imaging.

Key words: radar imaging; short range imaging; two-dimensional synthetic aperture; imaging algorithm

近年来,随着恐怖袭击威胁的上升,在机场车站等地方对出入人员进行安全检测十分重要。检测的主要对象是隐藏在人体衣物内的武器,以及包裹和行李箱内的危险物品。目前的检测手段主要有 X 射线探测系统和金属检测器。这些检测系统在某些方面是有效的,但是也有很多缺点。金属检测器只能检测金属物品,比如手枪和匕首等。对于一些现代的武器,比如塑料或者陶瓷手枪、液体炸弹等,金属检测器就无法检测出来。而对于一些带有金属的日常用品,比如皮带扣、钥匙等,也会被金属检测器检测出来,因此会带来很多的虚警。为了克服金属检测器的缺点,有效的办

法是采用成像系统。毫米波成像系统和 X 射线成像系统都能够实现这个功能,但是 X 射线会对人体产生危害。毫米波成像系统采用的是毫米波,并且发射功率很低,不会对人体产生危害。毫米波成像系统能够穿透衣物和包裹,对隐藏物品成像,已成为安检设备的重要发展方向^[1-3]。

毫米波成像系统一般采用合成孔径体制成像。传统的合成孔径雷达(SAR)作为一种微波成像设备,一般采用一维合成孔径实现方位向分辨,采用大带宽信号实现距离向分辨,得到二维图像。这在一般的地面侦察等场合是一种有效方式,因为地形地面侦察成像距离较远,但是分辨率要求

* 收稿日期:2013-11-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60903206);国家部委资助项目

作者简介:张寅生(1980—),男,湖南安乡人,博士研究生,E-mail:dhzhang@nudt.edu.cn;

杨俊刚(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:yangjungang@nudt.edu.cn

不是很高,依靠一维合成孔径和大带宽信号就可满足要求。在安检场合,成像距离很近,但要求的分辨率很高,以 2.5cm 分辨率为例,若依靠信号带宽来实现,要求 6GHz 的信号带宽,实现如此大的信号带宽是相当困难的。若依靠合成孔径来实现,分辨率取决于信号波长和积累角,不受限于信号带宽,因此,可以考虑依靠二维合成孔径来实现二维超高分辨率成像^[4-7]。二维合成孔径已经能够实现二维分辨,因此,采用单频信号就可得到二维图像。传统的一维合成孔径,大带宽信号 SAR 二维成像得到的图像是场景到成像平面的投影。在近场超高分辨率成像场合,可以形成一个平行于待成像区域的二维平面合成孔径,所得图像是场景在合成孔径平面上投影。

传统的 SAR 成像算法,例如距离多普勒(RD)、线性调频变标(CS)等,都是针对采用大带宽信号的一维合成孔径形式,在距离向采用距离压缩的方式,距离方位解耦之后进行方位压缩得到二维图像。二维合成孔径成像系统在两个维度都采用合成孔径方式,因此传统 SAR 成像中的距离维处理也变为合成孔径处理,成像算法也应作相应的改进。

1 二维平面合成孔径成像系统

首先建立信号与几何关系的模型。如图 1 所示,目标所处的位置的坐标为 (x, y, z) , 合成孔径平面垂直于 Y 轴,原点到合成孔径平面的距离为 R_0 ,孔径平面内的天线收发位置为 (x_a, R_0, z_a) ,则天线到目标的距离为

$$R(x_a, R_0, z_a) = \sqrt{(x - x_a)^2 + (y - R_0)^2 + (z - z_a)^2} \tag{1}$$

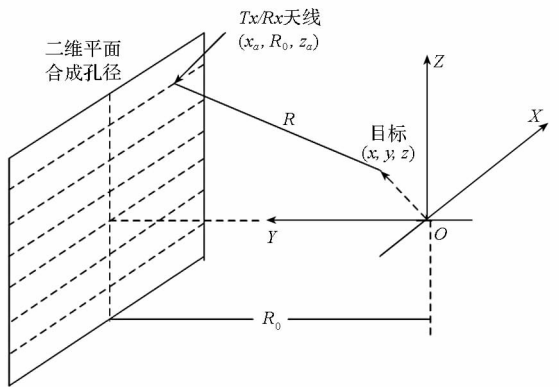


图 1 二维平面合成孔径成像系统示意图

Fig. 1 Illustration of Imaging system with 2-D planar synthetic aperture

1.1 横向参数

在传统 SAR 中,方位向分辨率可通过多普勒带宽和雷达速度来计算。在本文描述的系统,可以借鉴传统 SAR 的思想,引入一个虚拟的平台速度 V ,用来计算系统分辨率

$$R_s = \frac{V}{B_a} = \frac{V}{2\sin(\theta/2) \cdot 2V/\lambda} = \frac{\lambda}{4\sin(\theta/2)} \tag{2}$$

其中, θ 为积累角, λ 为单频信号的波长。由此可见,系统的分辨率与波长和积累角有关。

在积累角达到 180° 时,横向分辨率达到最大。由式(2)可知,横向分辨率上限不超过 $\lambda/4$ 。假设需要的分辨率为 0.01m,则频率不能低于 7.5GHz。孔径平面的最小空间采样间隔为分辨率 R_s 。图 2 给出了方位分辨率要求为 0.01m,合成孔径长度和最低频率之间的关系。

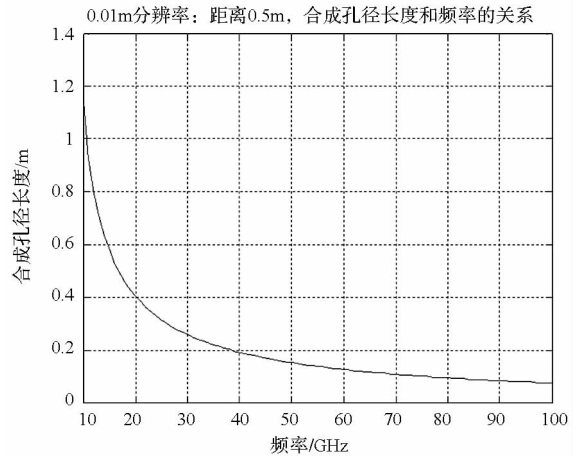


图 2 合成孔径长度和最低频率之间的关系
Fig. 2 Synthetic aperture length with respect to lowest frequency

1.2 孔径实现方式

单频信号实现二维成像需要二维平面合成孔径。实现二维平面合成孔径一般有以下三种方式:

- (1) 单天线,二维扫描。优点:系统简单。缺点:扫描时间长,难以满足实际应用中成像时间的要求。
- (2) 一维线性阵列,一维扫描。系统复杂程度与成本适中,扫描时间较短。
- (3) 二维平面阵列。优点:不需要机械扫描。缺点:系统复杂,成本较高,天线单元一致性难保证。

综合考虑,一维线性阵列,一维扫描是个折中的方案,比较容易实现,实际系统中可优先采用此方式。

1.3 阵列的排布

在积累角等于波束角时,分辨率近似为 $D/2$, D 为天线实际孔径。空间采样间隔最大为分辨率 $D/2$, D 与天线物理尺寸相当,如果单排排布,则最小阵元间隔为 D ,不能满足采样间隔要求。所以阵元要采用双排(甚至多排)排布,如图3所示。

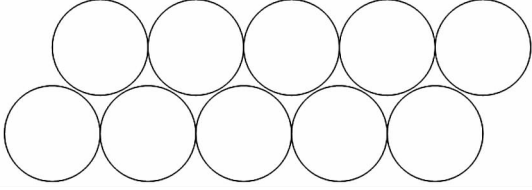


图3 双排阵元排布示意图

Fig.3 Illustration of double row array distribution

1.4 频率的选择

通过以上信号和横向参数分析知,在墙内目标探测系统中,穿透性和分辨率是一对矛盾。穿透性要求较低频率,较低频率信号波长较长,合成孔径平面需要更大积累角。较高频率信号波长较短,在同样分辨率情况下,积累角可以很小,但是较高频率穿透性较差。

2 二维平面合成孔径成像算法

考虑发射单频信号

$$s_t = \exp(-j2\pi f_c t) \quad (3)$$

省略幅度常数项,距离 R 处的目标反射回波为:

$$s_r = s(x, y, z) \exp[-j2\pi f_c (t - 2R(x_a, R_0, z_a)/c)] \quad (4)$$

其中, $R(x_a, y_a, z_a)$ 如式(1)中所示。

混频参考信号为

$$s_{r0} = \exp[-j2\pi f_c (t - 2R_0/c)] \quad (5)$$

把发射信号和接收信号混频,得到:

$$d(x_a, R_0, z_a) = s(x, y, z) \exp(jk_r R_0) \exp(-jk_r R) \quad (6)$$

其中 $s(x, y, z)$ 为 (x, y, z) 处的散射系数, $k_r = \frac{4\pi f_c}{c}$ 为常数。

可以用相参积累的方法^[8]来实现散射点重建:

$$\begin{aligned} s(x, y, z) &= \iint d(x_a, R_0, z_a) \exp(-jk_r R_0) \exp(jk_r R) \\ &= \iint_A d(x_a, R_0, z_a) \exp(-jk_r R_0) \end{aligned}$$

$$\exp(jk_r \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-R_0)^2 + (z-z_a)^2}) dx_a dz_a \quad (7)$$

改写式(7),得到

$$\begin{aligned} s(x, y, z) &= \exp(-jk_r R_0) \iint_A d(x_a, y_a, z_a) \\ &\exp[jk_r \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-R_0)^2 + (z-z_a)^2}] dx_a dz_a \end{aligned} \quad (8)$$

注意,式(8)中后面的二维积分是关于平面孔径坐标的二维卷积,即 $d(x_a, y_a, z_a)$ 与 $\exp[jk_r \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-R_0)^2 + (z-z_a)^2}]$ 关于 x_a, z_a 的二维卷积。二维卷积可以在频域计算,与一维卷积的频域计算类似,先分别计算 $d(x_a, y_a, z_a)$ 关于 x_a, z_a 的二维傅立叶变换和 $\exp[jk_r \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-R_0)^2 + (z-z_a)^2}]$ 关于 x_a, z_a 的二维傅立叶变换,再进行二维频谱相乘,二维逆傅立叶变换得到结果^[9-10]。

所以,关键问题是计算

$$\begin{aligned} E(k_x, k_z) &= \iint \exp(jk_r \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-R_0)^2 + (z-z_a)^2}) \\ &\exp(-jk_x x - jk_z z) dx dz \end{aligned} \quad (9)$$

由驻相点原理^[11],可得到

$$E(k_x, k_z) = \frac{2\pi k_r}{jk_y^2} \exp(-jk_y (y - R_0)) \quad (10)$$

$$k_y = \sqrt{k_r^2 - k_x^2 - k_z^2} \quad (11)$$

于是

$$\begin{aligned} s(x, y, z) &= \exp(-jk_r R_0) \iint_{k_x, k_z} D(k_x, R_0, k_z) \frac{2\pi k_r}{jk_y^2} \\ &\exp[-jk_y (y - R_0)] \exp(jk_x x + jk_z z) dk_x dk_z \end{aligned} \quad (12)$$

进行参考点处的相位补偿,即匹配滤波

$$H_{mf} = \exp[-jk_r R_0 + jk_y (y - R_0)] \quad (13)$$

可以看出,匹配滤波必须已知目标的距离 y , 即匹配滤波聚焦只能针对某一固定距离 y , 对其他的距离是散焦的。实际中可以通过选择不同的 y 来对不同距离的目标聚焦。这个特性决定了单频信号二维合成孔径可以具有一定的距离分辨能力。

匹配滤波以后,信号变为

$$\begin{aligned} s(x, y, z) &= \iint_{k_x, k_z} D(k_x, R_0, k_z) \frac{2\pi k_r}{jk_y^2} \exp(jk_x x + jk_z z) dk_x dk_z \end{aligned} \quad (14)$$

由于 $\frac{k_r}{k_y^2} \approx \frac{1}{k_r}$, 成像过程中可忽略其影响。可以看出,式(14)就是一个二维IFFT过程,所以最

后可通过二维 IFFT 得到聚焦图像。

以上二维合成孔径成像算法只需采用一维插值和 FFT 或 IFFT 运算,算法运算量较小。通过插值处理,可在频域实现对原始信号的精确匹配,因此算法聚焦精度较高。

3 仿真实验

仿真参数如表 1 所示。图 4 给出了二维平面孔径成像系统的成像结果,可以看到,点目标在两个横向维度都具有良好的聚焦。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

仿真参数	数值
中心频率	94GHz
中心距离	1m
天线方位向孔径	0.02m
采样间隔	0.002m
x 向采样点数	128
z 向采样点数	128

为了验证距离失配对成像结果的影响,针对不同距离的成像结果见图 5。可以看到,聚焦效果依赖于匹配距离选择的准确性,但是对距离选择并不敏感,距离失配达 0.1m 时目标才有明显散焦,这也说明了单频信号二维合成孔径成像距离向的分辨率能力较差。若需要距离分辨率,还应结合宽带信号才能实现。

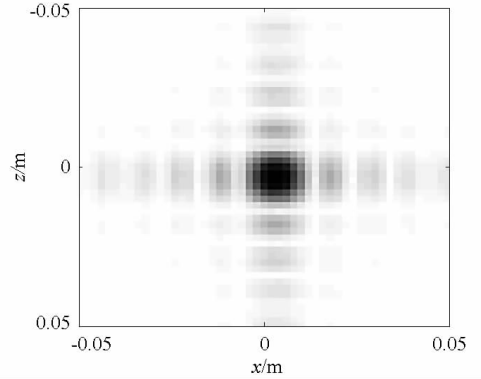


图 4 二维成像结果

Fig. 4 2-D imaging result

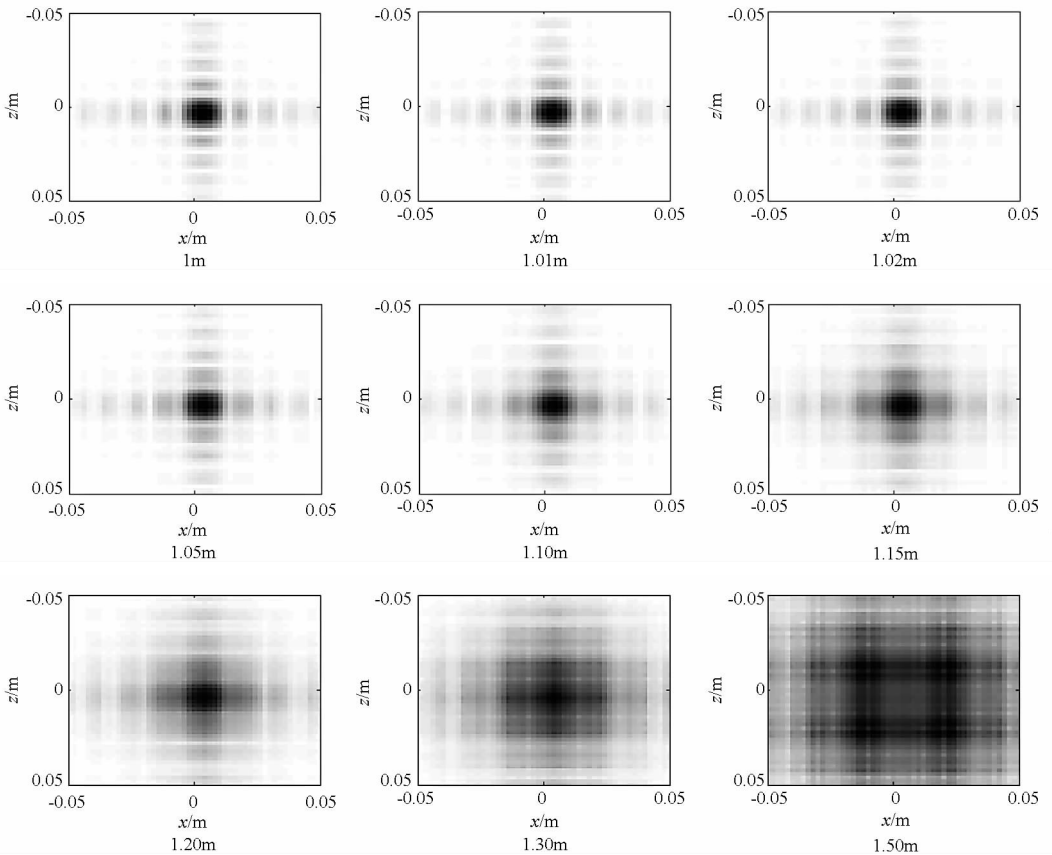


图 5 距离失配对聚焦的影响

Fig. 5 Influence of range mismatching on focusing quality

4 结束语

微波成像系统墙内目标探测是一个具有挑战

性的技术难题,在分辨率、电磁波的穿透性等方面都是有待解决的问题。本文介绍了一种合成二维平面孔径,利用单频信号的微波成像系统,详细推

导了单频信号二维平面合成孔径的成像算法,仿真结果表明了该算法的有效性。信号的频段选择、墙体的电磁特性将是下一步的研究工作。

参考文献 (References)

- [1] Pinchuk R, Sklarczyk C, Bulavinov A, et al. Stand-off detection of suspicious concealed objects in centimeter and millimetre-wave range using sampling phased array principle and sparse array [C]//Proc of EUSAR 2008, Friedrichshafen, Germany, 2008.
- [2] Bertl S, Dallinger A, Detlefsen J. Interferometric focusing for the imaging of humans [C]//Proc of EUSAR2008, Friedrichshafen, Germany, 2008.
- [3] Hägelen M, Briese G, Essen H, et al. Millimetre wave near field SAR scanner for concealed weapon detection [C]//Proc of EUSAR 2008, Friedrichshafen, Germany, 2008.
- [4] Lei D, Wang Y P, Hong W, et al. Downward-looking 3D-SAR with dual-transmit and multiple-receive linear array antennas based on time and waveform diversity [C]//Proc of APSAR 2009, Xi'an, China, 2009: 17-20.
- [5] Gavin H, Bernie M. SAR 3D scene reconstruction using Fourier imaging techniques [C]//Proc of IET Seminar on High Resolution Imaging and Target Classification, London, UK, 2006: 53-60.
- [6] Lei D, Wang Y P, Hong W, et al. Analysis of 3D-SAR based on angle compression principle [C]//Proc of IGARSS 2008, Boston, USA, 2008: 1324-1327.
- [7] Klare J, Cerutti-Maori D, Brenner A, et al. Image quality analysis of the vibrating sparse MIMO antenna array of the airborne 3D imaging radar ARTINO [C]//Proc of IGARSS 2007, Barcelona, Spain, 2007: 5310-5314.
- [8] Ulander L M, Hellsten H, Stenstrom G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 760-776.
- [9] Sheen D M, McMakin D L, Hall T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(9): 1581-1592.
- [10] Lopez-Sanchez J M, Fortuny-Guasch J. 3-D radar imaging using range migration techniques [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(5): 728-737.
- [11] Cumming I G, Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation [M]. Boston: Artech House, 2005.