

基于因子分析法和图像对比度的穿墙雷达杂波抑制

张澜子* 陆必应 周智敏 孙鑫

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 在穿墙成像中, 墙体反射波、天线耦合波等杂波常常将目标信号淹没, 严重影响了目标的探测、定位等后续处理。为解决这一问题, 该文采用因子分析法抑制杂波, 并提出一种新的准则——图像对比度, 作为因子选择的衡量标准。为验证了这一方法的有效性, 该文设计了暗室穿墙实验, 分别对木板墙和混凝土墙后目标进行探测, 并采用所提出的方法对得到的回波数据进行处理, 实验结果表明, 该方法能够在目标信息未知的条件下, 得到最优的杂波抑制结果。

关键词: 穿墙成像雷达; 杂波抑制; 因子分析; 图像对比度

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)11-2686-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00063

The Clutter Suppression Based on Factor Analysis and Image Contrast in Through-the-wall Application

Zhang Lan-zi Lu Bi-ying Zhou Zhi-min Sun Xin

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In Through-the Wall Imaging (TWI), the clutter, because of its great energy, has great effect on the detection of the targets. For the purpose of clutter suppression, Factor Analysis (FA) method is applied to TWI data. Besides, a new evaluation criterion, image contrast, for selecting the proper factors is introduced. To validate the method experimentally, a set of through-the-wall experiments in an anechoic chamber are designed. The experimental results indicate that the technique based on FA and image contrast can efficiently suppress the clutter without *a priori* knowledge about targets.

Key words: Through-the-Wall Imaging Radar (TWIR); Clutter suppression; Factor Analysis (FA); Image contrast

1 引言

穿墙成像雷达(Through-the-Wall Imaging Radar, TWIR)是利用电磁波的低频穿透特性对墙壁、建筑等障碍物后的隐蔽目标进行探测、成像的超宽带雷达系统, 在反恐斗争、灾害救援等领域都有广阔的发展前景, 成为近年来雷达领域的一个研究热点^[1]。在穿墙应用中, 目标信号常常淹没在天线耦合波、墙壁反射波及噪声等杂波中, 因此如何有效地抑制杂波, 提高目标的检测率具有极为重要的应用价值。

近年来, 统计方法越来越多地应用到穿墙领域中, 如奇异值分解法^[2,3] (Singular Value Decomposition, SVD)、主成分分析法^[4,5] (Principal

Component Analysis, PCA), 独立成分分析法^[6] (Independent Component Analysis, ICA)以及因子分析法(Factor Analysis, FA)。它们的共同优点是不需要任何目标的先验信息就可以有效地提取目标信号从而实现抑制杂波的目的。文献[7,8]比较了这些方法抑制杂波的实验结果, 结果表明利用ICA可获得最优抑制效果, 但是与PCA和FA不同, ICA利用高阶统计量^[9]将数据分解为互相独立的新分量, 而PCA与FA只是根据二阶统计量求得新分量, 算法更为简单。除此之外, 相对于SVD, PCA而言, FA抑制杂波后图像的信噪比较高, 而且因子分析法的模型更能反映实际情况, 因此本文采用FA算法抑制杂波。

如何判别杂波抑制的效果^[10-12], 这也是一个关键问题。传统的评价准则包括信杂比(Signal to Clutter Ratio, SCR)等。然而, 这些值的计算往往都需要获取目标数量、位置等先验信息, 这在实际应用中是很难得到的。因此本文提出用图像对比度作为判定准则, 对比度能够反映图像像素值的变化

2013-01-15 收到, 2013-05-30 改回

国家自然科学基金(61271441, 60972121), 全国优秀博士学位论文作者专项资金(201046), 新世纪优秀人才支持计划 (NCET-10-0895) 和国防科技大学科研计划项目(CJ12-04-02)资助课题

*通信作者: 张澜子 zhanglanzi5insist@yahoo.com.cn

情况，对比度越大表示存在强散射点的概率大，反之，存在孤立散射点的可能性小。而在穿墙应用中，当强杂波几乎完全消除时，便可将目标看作“强散射体”，此时对比度会达到一个极大值。故用图像对比度作为评价杂波抑制效果的准则是可行的。

鉴于以上研究背景，本文的章节安排如下：第 2 节介绍了穿墙雷达的基本信号模型；采用 FA 法进行杂波抑制的基本理论在第 3 节给予讨论；第 4 节中提出了一种新的评价准则——图像对比度，以解决 FA 法中的因子选择问题；在第 5 节设计了暗室穿墙实验，并采用本文提出的算法对实测数据进行处理，以验证其有效性；最后对本文提出的方法进行了总结分析。

2 穿墙雷达信号基本模型

步进频信号是穿墙应用中最广泛使用的信号体制。假设步进频点数为 K ，信号由发射天线 T 发射并被天线 R 进行接收， N 个接收天线平行于墙壁放置，其信号模型如图 1 所示。发射信号 $x(t)$ 为^[13,14]

$$x(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \text{rect} \left[\frac{t - kT - T/2}{T} \right] \exp [j2\pi (f_0 + k\Delta f)t] \quad (1)$$

式中 T 为脉冲宽度， f_0 为起始频率，步进间隔为 Δf 。若存在 Q 个目标，则单个天线接收到的回波为

$$y(t) = \sum_{q=1}^Q \sigma_q x(t - \tau_{n,q}) \quad (2)$$

其中 σ_q 是第 q 个目标的幅度衰减因子，它由墙体透射系数和目标反射系数共同决定， $\tau_{n,q}$ 是第 q 个目标与第 n 个天线的延时，包括在介质 1 中以光速 c 传播和墙体内部以速度 $c/\sqrt{\epsilon_r}$ 传播的延时 (ϵ_r 是墙体介质的相对介电常数)。假设 T 远大于延时 $\tau_{n,q}$ ，将接收信号与被耦合到接收端的发射信号进行混频并采样，则第 n 个天线接收的信号为

$$S_{(n)} = \sum_{q=1}^Q \sigma_q \exp [-j2\pi (f_0 + k\Delta f) \tau_{n,q}] \quad (3)$$

对 $S_{(n)}$ 进行 M 点逆傅里叶变换，将频域数据变换到空域 $s_{(n)}$ ，然后将 N 个天线的接收数据按列的

形式排列，得到回波数据矩阵 S_{Re} ，即 B-Scan 矩阵，满足

$$S_{Re} = [s_{(1)} \quad s_{(2)} \quad \cdots \quad s_{(N)}]_{M \times N} \quad (4)$$

由图 1 可看出，接收天线所接收到的数据不仅包含目标信号 S_{Tg} ，还有大量的杂波，如墙体反射波、天线耦合波、噪声等，本文旨在提取目标信号，故而将除目标外的任何散射体引入的信号均认为是杂波。由于墙体反射波和天线耦合波能量最强，以至于常常将目标信号淹没，故而是 TWI 中首要抑制的杂波，记为背景信号 S_{Bg} ，除此之外还有各种噪声带来的杂波 S_{Ns} ，因此回波信号 S_{Re} 是这 3 种信号的叠加，即

$$S_{Re} = S_{Bg} + S_{Tg} + S_{Ns} \quad (5)$$

杂波抑制的目的就是尽可能地抑制 S_{Bg} 和 S_{Ns} ，从而凸显目标信号 S_{Tg} 。

3 因子分析法抑制杂波

因子分析理论属于多元分析中降维处理的一种统计方法。它通过研究协方差矩阵或相关矩阵，探求众多变量之间的内部依赖关系，从而将具有复杂关系的多个变量综合为少数的几个因子，再现原始变量与因子之间的关系。 N 维变量具有 $P(P \leq N)$ 个因子的因子分析模型^[15]为

$$X = AF + \varepsilon \quad (6)$$

其中 $X = (X_1, \dots, X_N)^T$ 是 N 维可观测向量， $F = (F_1, F_2, \dots, F_P)^T$ 称为公共因子，即降维后不相关的特征。矩阵 $A = (a_{ij})_{N \times P}$ 为因子载荷矩阵，元素 a_{ij} 表示第 i 个变量 X_i 在第 j 个因子 F_j 上的负荷。 $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N)^T$ 称为特殊因子，表示原有变量不能被公共因子变量所解释的那部分。

由 FA 的基本理论可知，因子分析法可以将原始数据从高维空间投影到更具意义的低维空间，以达到减少冗余数据的目的。而根据上文的分析，在穿墙应用中，回波矩阵可由背景、目标及噪声 3 个子空间描述。因此可采用 FA 将具有较多特征的回波矩阵表示成某几个不相关的综合特征的线性组合，这些综合特征便代表了 3 个子空间的特征，然后选择能够表示目标子空间的特征重构回波数据，从而达到抑制杂波的目的。

传统 FA 抑制杂波过程中，通常将降维后的第 1 个特征作为墙体特征，第 2 个特征则看作是目标特征。然而这种方法只适用于单发单收天线阵列，此时发射信号垂直照射到墙体，可认为每个天线位置接收的墙体回波是相同的，则 B-Scan 矩阵所有的列向量是相同的，即回波矩阵秩为 1，也就是说墙体

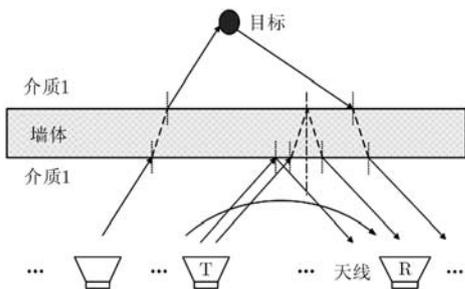


图 1 穿墙雷达信号模型

对应第 1 个特征。但是随着多输入多输出(MIMO)体制越来越多的运用到 TWI 中,各个天线接收到的信号时延不再完全相同,因此 B-Scan 矩阵的各个列向量就不再完全相同,即墙体的回波将由几个特征而并非一个来表征,故需要通过迭代的方式选择特征。因此利用 FA 法从原始回波矩阵提取目标信号的步骤如下:

(1)预处理,对 \mathbf{S}_{Re} 进行标准化处理,计算回波数据的相关系数矩阵 \mathbf{R} 。

(2)估计因子模型参数,根据特征值的累积贡献率决定低维空间维数 P ,对 \mathbf{R} 进行特征分解,选取前 P 个特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_P$ 及对应的特征向量 $\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_P$,得到因子载荷矩阵 $\mathbf{A}=(a_{ij})_{N \times P}=(\sqrt{\lambda_1} \mathbf{u}_1, \dots, \sqrt{\lambda_P} \mathbf{u}_P)$ 。舍弃的较小特征值可认为对应的是噪声子空间。

(3)因子选择,估计不可观测的随机矢量 $\hat{\mathbf{F}}$,计算每个因子的方差贡献 $g_j^2 = \sum_{i=1}^N a_{ij}^2 (j=1, 2, \dots, P)$,能量较强的背景信号对应贡献大的因子,而紧随其后的因子 $\{\mathbf{F}_p, \dots, \mathbf{F}_P\} (1 \leq p < P)$ 则张成目标子空间。

(4)数据重构,选择能代表目标子空间的公共因子 $\tilde{\mathbf{F}} = (\hat{\mathbf{F}}_p, \dots, \hat{\mathbf{F}}_P)^T$ 及载荷矩阵为 $\tilde{\mathbf{A}}=(\mathbf{A}_p, \dots, \mathbf{A}_P)$,由此得到杂波抑制后的回波数据 $\mathbf{S}'_{\text{Re}} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{F}}$,进而对其进行 BP 成像^[16]则得到最终结果。

4 结合图像对比度的穿墙雷达杂波抑制

根据上文分析,在步骤(3)中认为选取适当的因子 p 可实现杂波抑制,那么如何选择成为杂波抑制的核心问题。在穿墙成像中,杂波抑制的目的是使目标在成像结果中凸显,因此信杂比无疑是评价抑制效果的最优准则。然而其计算过程必须要获得目标的数目和位置等先验信息,这使得问题变得非常复杂,本文引入图像对比度解决该问题。

图像对比度反映像素强度的变化情况,对比度越大表示图像强弱越分明,说明存在强散射点的概率越大,而对比度越小则表示像素强度在其均值上下的起伏较小,即存在强散射点的可能性也较小。此处采用图像强度的标准偏差与均值的比值作为对比度准则^[17],即

$$\text{Ct} = \frac{\sqrt{E\left\{\left[\mathbf{I}^2(i, j) - E\left[\mathbf{I}^2(i, j)\right]\right]^2\right\}}}{E\left[\mathbf{I}^2(i, j)\right]} \quad (7)$$

式中 Ct 表示对比度, $\mathbf{I}^2(i, j)$ 表示图像中第 (i, j) 像素的强度, $E(\cdot)$ 为期望算子。将其应用到穿墙成像中,根据 FA 抑制杂波的原理,由累积贡献率得到 P ,将 p 从 1 到 P 进行遍历选择对应于目标子空间的公共因子 $\tilde{\mathbf{F}} = (\hat{\mathbf{F}}_p, \dots, \hat{\mathbf{F}}_P)^T$,从而对新回波数据进行

BP 成像。若对原始数据成像, \mathbf{S}_{B_0} 对应的图像像素值很高,对比度达到最大值,随着 \mathbf{S}_{B_0} 的不断抑制,对比度逐渐下降。当它被几乎完全消除时,此时目标成为“强散射体”,对比度曲线出现跃变,随着 p 继续增大,目标信号也被抑制,对比度值继续下降。因此背景杂波抑制前后,图像的对比度处于两段不同的变化曲线,而跃变点对应的 p 可认为是目标子空间的起始因子数,此时得到的图像即为最优的杂波抑制结果。然而在实际数据处理中,对比度曲线可能不只有一个跃变点,在这种情况下则将第 1 个跃变点对应的 p 作为背景与目标子空间的分界点,这是因为穿墙雷达实际工作中所要穿透的墙体并不是理想的单层匀质墙体,如混凝土墙,再加上周围环境的影响,会存在大量杂波,在杂波抑制过程中,即随着 p 的增大,可能会出现一些由杂波造成的虚假目标,使得对比度曲线出现多个极大值,但是由于墙体作为稳定强散射体存在,故这一现象只会出现在噪声子空间,因此后几个跃变点是没有任何意义的。因子分析法与图像对比度结合的穿墙雷达杂波抑制算法的处理流程如图 2 所示。

5 实验建立及结果分析

为验证本文提出方法的有效性,设计了穿墙暗室实验。实验中所用墙体包括木板墙和混凝土墙,前者可看作是由单层匀质材料构成,即通常情况下所谓的理想墙体,可通过该组实验验证系统性能,后者则更接近于穿墙雷达的实际工作环境,有利于验证本文所提方法的有效性。针对上述两组情况,实验分别采用阿基米德螺旋天线和喇叭口天线作为穿墙实验收发天线^[18],与 Agilent N5242A 矢量网络使用构建暗室试验测量系统。系统配置示意图如图 3 所示。

5.1 木板墙后目标探测

采用步进频信号对木板墙后目标进行探测,起始频率为 0.5 GHz,带宽 1.5 GHz,步进间隔为 2

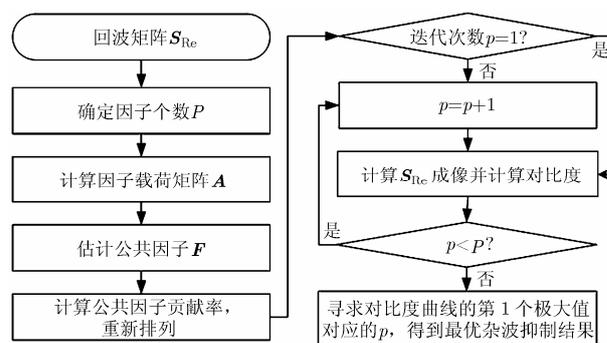


图 2 杂波抑制算法流程图

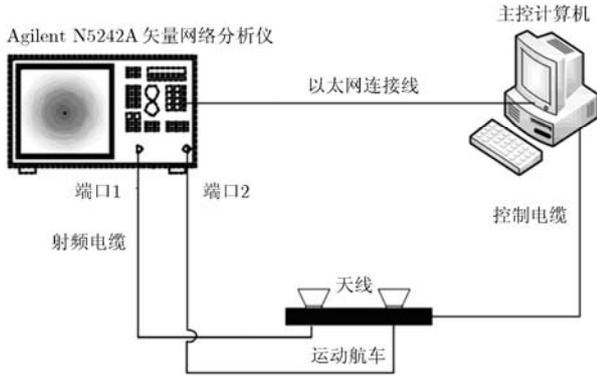


图 3 暗室试验测量系统示意图

MHz, 则步进频点数为 $M = 501$, 收发天线间距 0.2 m, 绝对高度 1.3 m, 与墙体间的垂直距离为 0.75 m, 采用 2 cm 的木板墙, 墙后 0.82 m 处放置一个三面角, 运动航车扫描位置为 $N = 33$ 。场景如图 4 所示。

对原始回波数据进行 BP 成像, 如图 5 所示, 可以看出, 未处理的图像中无法观测到任何目标信息。按照本文提出的方法处理回波数据, 低维空间维数 $P = 13$, 计算各图像的对比度, 结果如图 6 所示。从图中看出当 $p = 4$ 时, 图像对比度出现跃变, 根据上文分析, 此时为最优的杂波抑制结果。

为验证结论的有效性, 各图像的 SCR 如图 7 所示, 可看出在 $p = 4$ 时, SCR 也达到最大值。为进一步证明该结论, 给出 $p = 3$ 和 $p = 5$ 时的成像结果

(如图 8 和图 9), 同样可以说明 $p = 4$ 时是最优结果。为说明图像中的强散射点确实为目标, 图 10 给出了背景对消后的成像结果。比较图 10 和图 11 可以看出 FA 法能很好地抑制杂波, 凸显目标。

5.2 混凝土墙后目标探测

采用起始频率为 500 MHz, 带宽 2 GHz, 步进间隔为 1 MHz 的步进频信号对混凝土墙后目标进行探测, 收发天线间距 0.82 m, 绝对高度为 1.3 m, 与墙体间的垂直距离为 1.38 m, 墙后 2 m 处放置 2 个间距 1.5 m 的三面角, 且都正对墙体, 运动航车扫描位置为 $N = 41$ 。实验场景示意图如图 12 所示。

由原始回波数据成像结果(如图 13)可看出目标信号完全被淹没。采用本文提出的方法对回波数据进行处理, 低维空间维数 $P = 11$, 各图像的对比度值如图 14 所示。从图中看出当 $p = 6$ 时, 图像对比度出现第 1 次跃变, 其成像结果如图 15 所示。计算每幅图像的 SCR(图 16)可知 $p = 6$ 时也可获得最大 SCR。与图 17 所示的背景对消后的成像结果相比, FA 法能很好地抑制墙体等杂波, 获取正确的目标信息。

然而, 容易看出图 17 中的方框区域(即墙体位置)存在大量杂波, 这是因为背景对消不完全导致的, 而图 15 中该区域中杂波几乎为零, 其原因在于, 本文认为原始回波数据是背景、目标和噪声 3 种信

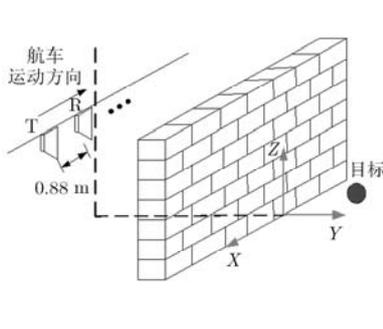


图 4 穿墙场景结构示意图

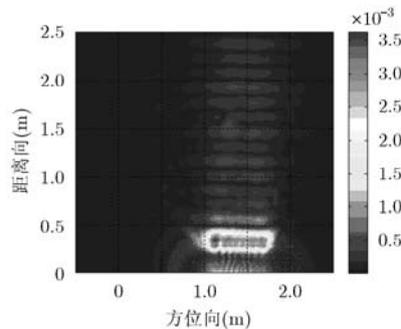


图 5 未进行杂波抑制的成像结果

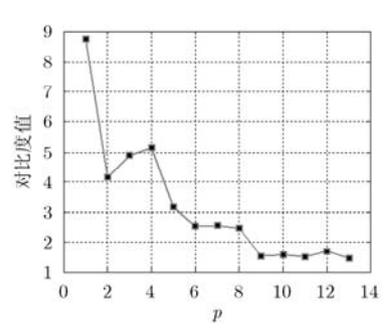


图 6 对比度值

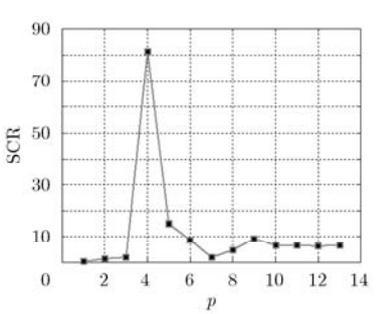


图 7 SCR

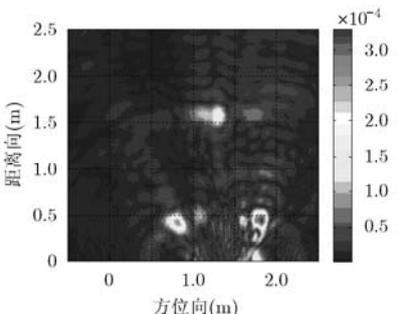


图 8 FA 法抑制杂波后的成像结果($p = 3$)

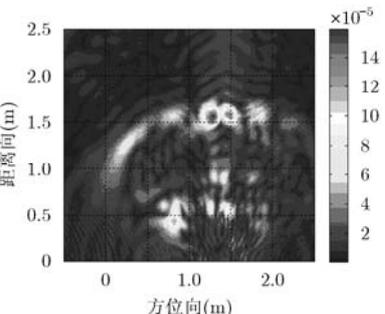


图 9 FA 法抑制杂波后的成像结果($p = 5$)

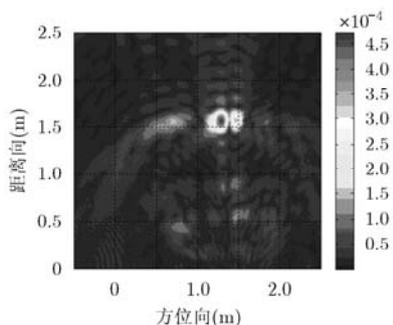


图 10 FA 法抑制杂波后的最优成像结果

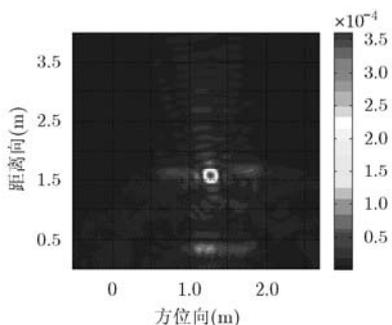


图 11 背景对消后的成像结果

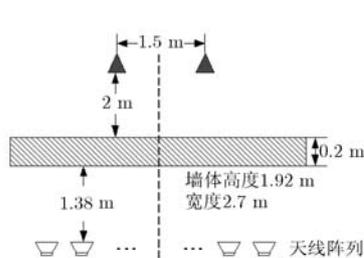


图 12 混凝土墙后目标探测场景结构示意图

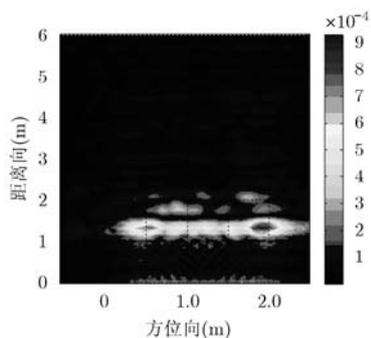


图 13 未进行杂波抑制的成像结果

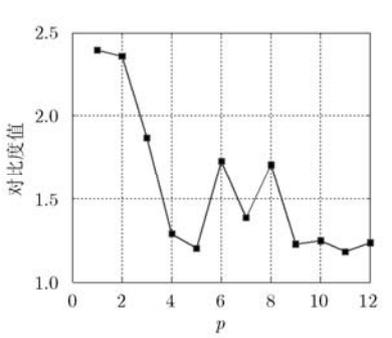


图 14 对比度值

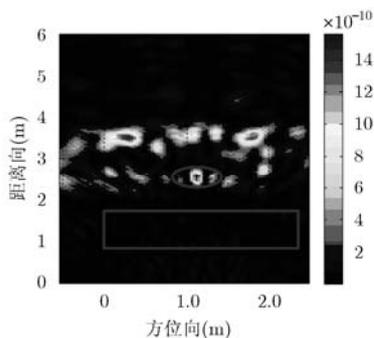


图 15 FA 法抑制杂波后最优成像结果

号的叠加，而在处理过程中只提取目标信号，即 p 到 P 个特征对应的子空间，因此在最终的成像结果中几乎不包含墙体信息，故而在墙体位置几乎不存在杂波。除此之外，可以看到椭圆框内存在虚假目标，其幅值可与目标相比拟，这是由 FA 方法的本质决定的。在选取公共因子的过程中，随着 p 的增大， p 之前的因子舍去，可以认为这是一个不断“削弱”的过程，即将强杂波不断削减直至显示目标。那么在该过程中，必然会存在与目标幅值相同的某些杂波，在目标显示的同时，这些杂波也出现，从而造成虚假目标，这需要在后续的目标检测中解决，本文不作讨论。

5.3 混凝土墙后人体目标探测

本实验中，系统参数及天线等均与 5.2 节中一

样，只将运动航车扫描位置减为 $N = 21$ 。实验场景如图 18 所示。原始回波数据成像结果如图 19，同样无法直接获取目标信息。对回波数据进行处理，低维空间维数 $P = 11$ ，各图像的对比度值如图 20 所示，可知 $p = 7$ 时为最优杂波抑制结果，根据 SCR 曲线(图 21)可得到同样的结论。与 5.2 节分析相同，与图 22 相比，图 23 中墙体位置处几乎无杂波，但也存在如椭圆框所示的虚假目标，这在实际应用中是不可避免的。

6 结论

本文提出了基于因子分析法和图像对比度的穿墙雷达杂波抑制方法。该方法先是对原始数据降维处理，进而抽取目标子空间对应的数据。因此处理过程中最大的问题就是如何选择因子的问题，即如

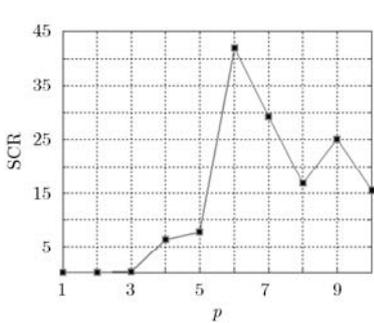


图 16 SCR

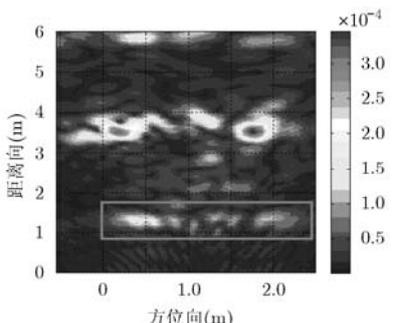


图 17 背景对消后的成像结果

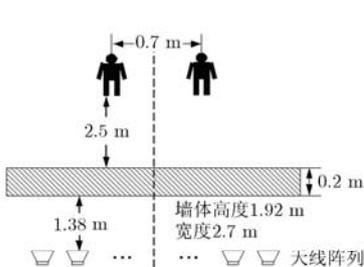


图 18 混凝土墙后人体目标探测场景结构示意图

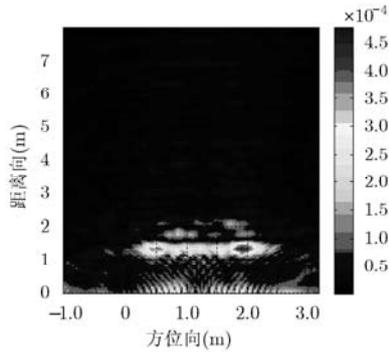


图 19 未进行杂波抑制的成像结果

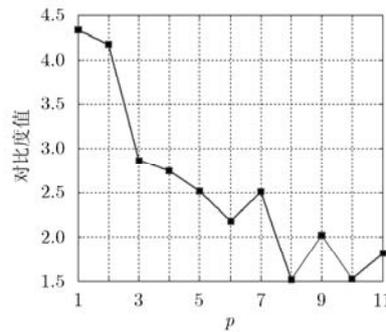


图 20 对比度值

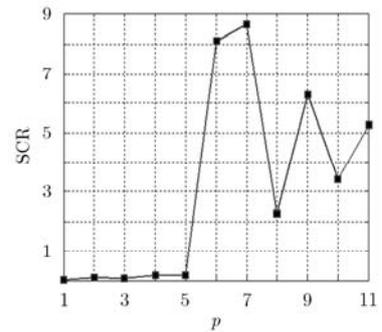


图 21 SCR

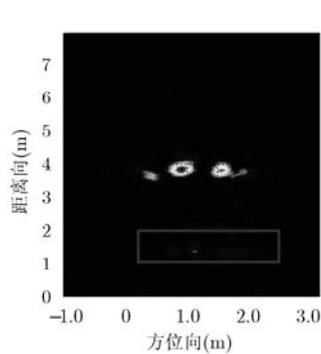


图 22 背景对消后的成像结果

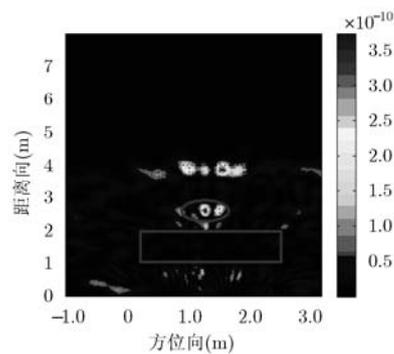


图 23 FA 法抑制杂波后最优成像结果

何使杂波抑制效果达到最优。本文引入图像对比度这一概念来评判杂波抑制效果，与传统的评价准则相比，图像对比度不需要目标的先验信息，算法简单，容易实现，有效解决了目标子空间的最优选择问题。

当然，从原理上分析，图像对比度反映的是杂波抑制后图像像素强度的对比关系，不能精确反映目标信号与杂波特征量的数量关系，但在一般的穿墙应用中，杂波抑制后噪声信号较弱，目标信号相对较强，二者对比明显，虽达不到墙体信号的对比度值，但仍易于分辨，所以图像对比度可以在不精确确定目标信息的前提下作为杂波抑制效果的评价准则。

参考文献

- [1] Amin M G. Through-the-Wall Radar Imaging[M]. New York: CRC Press, 2011: 307-309.
- [2] Riaz M M and Ghafoor A. Fuzzy logic and singular value decomposition based through wall image enhancement[J]. *Radio Engineering*, 2012, 21(2): 580-589.
- [3] Chandra R, Gaikwad A N, Singh D, et al. An approach to remove the clutter and detect the target for ultra-wideband through wall imaging[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2008, 5(4): 412-419.
- [4] Kabourek V, Cerny P, and Mazanek M. Clutter reduction based on principal component analysis technique for hidden objects detection[J]. *Radio Engineering*, 2012, 21(1): 464-470.
- [5] Riaz M M and Ghafoor A. Principle component analysis and fuzzy logic based through wall image enhancement[J]. *Progress in Electromagnetic Research*, 2012, 127: 461-478.
- [6] Abujarad F, Jostingmeier A, and Omar A S. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1999, 10(3): 626-634.
- [7] Gaikwad A N, Singh D, and Nigam M J. Application of clutter reduction techniques for detection of metallic and low dielectric target behind the brick wall by stepped frequency continuous wave radar in ultra-wideband range[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(4): 416-425.
- [8] Verma P, Gaikwad A N, Singh D, et al. Analysis of clutter reduction techniques for through wall imaging in UWB radar [J]. *Progress in Electromagnetic Research B*, 2009, 17: 29-48.
- [9] 谢尚平, 张阔. 高阶统计量在探地雷达数据处理中的应用[J]. *物探与化探*, 2012, 36(1): 122-125.
- [10] Xie Shang-ping and Zhang Kuo. An application of the effect of GPR data processing in high-order statistics[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2012, 36(1): 122-125.
- [10] Brunzell H. Detection of shallowly buried objects using

- impulse radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(2): 875-886.
- [11] Semenchuk E V and Lukyanov S P. The algorithmic methods of detection improvement and increase resolution at GRP sounding[C]. Proceedings of Siberian Conference on Control and Communication, Russia, 2009: 337-343.
- [12] 申家全, 闫怀志, 胡昌振. 基于图像熵的探地雷达杂波抑制效果评价[J]. 电波科学学报, 2011, 26(2): 267-271.
Shen Jia-quan, Yan Huai-zhi, and Hu Chang-zhen. Evaluation method based on image entropy for clutter suppression effect of ground-penetrating radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(2): 267-271.
- [13] 介利军, 欧阳缙, 杨洁. 超宽带穿墙雷达成像技术研究[J]. 现代雷达, 2012, 34(5): 35-39.
Jie Li-jun, Ouyang Shan, and Yang Jie. A study on ultra wideband through-wall radar imaging technology[J]. *Modern Radar*, 2012, 34(5): 35-39.
- [14] 张春城, 周正欧. 浅地层步进频率探地雷达的一种预处理方法[J]. 信号处理, 2004, 20(5): 507-511.
Zhang Chun-cheng, and Zhou Zheng-ou. A pre-processing method for stepped frequency ground penetrating radar of shallow subsurface detection[J]. *Signal Processing*, 2004, 20(5): 507-511.
- [15] Johnson R A and Wichern D W. Applied Multivariate Statistical Analysis[M]. 6th Edition, New Jersey: Prentice Hall, 2007: 482-516.
- [16] 王凌, 郑文军. 时间反转技术在超宽带穿墙雷达中的应用 [J]. 无线电工程, 2012, 42(5): 42-44.
Wang Ling and Zheng Wen-jun. Application of time reversal technique in ultra-wideband through-the-wall radar[J]. *Radio Engineering*, 2012, 42(5): 42-44.
- [17] 叶少华, 周荫清, 夏义华. 与图像对比度准则相结合的 PGA 自聚焦算法[J]. 现代雷达, 2004, 26(6): 26-28.
Ye Shao-hua, Zhou Yin-qing, and Xia Yi-hua. An improved phase-gradient autofocus algorithm combined with the image contrast criterion[J]. *Modern Radar*, 2004, 26(6): 26-28.
- [18] 吴世有, 谭恺, 徐艳云, 等. 超宽带穿墙雷达天线阵列配置分析及运动人体跟踪成像算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(11): 2601-2607.
Wu Shi-you, Tan Kai, Xu Yan-yun, et al. Study on UWB through-wall radar antenna array configuration and moving person tracking and imaging algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(11): 2601-2607.
- 张澜子: 女, 1988 年生, 硕士生, 研究方向为穿墙雷达杂波抑制.
陆必应: 男, 1976 年生, 副教授, 博士, 主要研究方向为超宽带雷达系统与信息处理.
周智敏: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为先进探测系统和技术、合成孔径雷达系统、合成孔径雷达成像及目标检测.