

基于扩展信源熵值的穿墙成像雷达墙体强杂波抑制

李家强 蔡洪渊 陈金立 李鹏 葛俊祥

A method of wall clutter removal for through-wall radar based on entropy of expanded antenna source

Li Jia-Qiang Cai Hong-Yuan Chen Jin-Li Li Peng Ge Jun-Xiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 198402 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.198402

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198402>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于哈达玛积扩展子空间的到达时间和波达方向联合估计

Joint for time of arrival and direction of arrival estimation algorithm based on the subspace of extended hadamard product

物理学报.2015, 64(7): 078403 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.078403>

基于海面散射模型的全极化合成孔径雷达海洋环境探测关键技术参数设计仿真研究

Simulation study on the design of key technical parameters in marine environment sounding with fully polarimetric synthetic aperture radar based on ocean surface scattering model

物理学报.2014, 63(21): 218401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.218401>

基于子带补偿的弹载聚束 SAR 成像算法

An imaging algorithm for missile-borne spotlight SAR based on subband compensation

物理学报.2014, 63(19): 198404 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.198404>

合成孔径雷达反演海面风场变分模型分析

Analysis on the variational model of synthetic aperture radar sea surface wind retrieval

物理学报.2014, 63(14): 148401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.148401>

基于分数阶傅里叶变换的弹载 SAR 成像算法

Imaging algorithm for missile-borne SAR using the fractional Fourier transform

物理学报.2014, 63(11): 118403 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.118403>

基于扩展信源熵值的穿墙成像雷达 墙体强杂波抑制*

李家强^{1)3)†} 蔡洪渊²⁾ 陈金立¹⁾²⁾ 李鹏²⁾³⁾ 葛俊祥¹⁾²⁾

1)(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

2)(南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

3)(江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 南京 210044)

(2015年1月12日收到; 2015年5月12日收到修改稿)

提出了基于扩展信源熵值理论的超宽带穿墙成像雷达墙体强杂波抑制方法. 首先将回波信号离散化, 计算离散信源的概率空间并对该离散信源进行扩展, 计算得到扩展后含有墙体强杂波和目标回波的新信源的熵值. 然后根据墙体杂波熵值与目标信号熵值的差异设定门限, 自适应选取最佳门限调节因子, 对回波信号进行杂波抑制处理. 经过墙体强杂波抑制处理后, 利用后向投影方法对目标进行成像. 以基于时域有限差分方法(Finite Difference-Time Domain, FDTD)的仿真软件GprMax2D/3D所获得的穿墙雷达数据进行仿真实验, 分别通过基于信源熵值的方法与本文所提方法来抑制墙体强杂波并成像, 通过对比结果可知, 前者的目标-杂波比增量为15.51 dB, 后者的目标-杂波比增量为19.74 dB. 因此, 本文所提方法能够在相同测量方式下得到更为精确的成像, 而且可以在保证成像效果的前提下大大减少天线扫描次数.

关键词: 杂波抑制, 穿墙雷达, 扩展信源熵值, 自适应门限

PACS: 84.40.Xb, 93.85.Bc, 95.75.Rs

DOI: 10.7498/aps.64.198402

1 引言

穿墙雷达(through-wall radar, TWR)技术兴起于20世纪90年代, 是一项非侵入式探测技术. 常见的探测仪器包括超声波传感器、红外线传感器、X射线传感器^[1]. 但是, 它们在穿透墙体探测目标方面存在一定的局限性, 主要原因如下: 超声波传感器容易受到噪声和温度的影响, 分层介质传播衰减严重; 红外线传感器在空气介质中根据热源差异能够有效探测到目标^[2], 但对于墙体等障碍物无法穿透; X射线传感器对于非空气介质具有一定的穿透性, 但对人体的损害很大. 而基于超宽带(ultra-wide-band, UWB)技术的穿墙雷达具有距离向分辨率高、穿透能力强等特性, 且不会对人体造成损

伤, 因此近年来广泛应用于军用和民用领域.

在穿墙成像雷达探测并对墙体后目标成像中, 墙体杂波即为墙体形成的后向散射回波, 而目标回波是指探测中所需要的雷达有效回波信号. 目标回波信号往往会淹没于墙体强杂波之中, 无法进行目标的检测与成像. 因此, 在成像之前必须对回波信号进行处理, 抑制或消除墙体杂波的干扰. 针对这一问题, 近年来国内外很多学者进行了大量研究^[3-7]. 基于Wi-Fi的穿墙雷达系统能够在一定的距离范围内检测运动的人体^[8,9]. 该雷达系统本身并不会发射任何电磁波, 因此不会被反雷达装置侦查出来. 然而, 正是由于这一特性, 在没有Wi-Fi信号源的场景中, 该雷达系统将无法有效工作. 利用先验信息的背景相消法能够很好地消除墙体杂波^[10,11]. 但是在实际应用中, 通常无法直接测量墙

* 国家自然科学基金(批准号: 61372066, 61302188)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20131005)和江苏高校优势学科建设工程自主项目(PAPD)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lijiaqiang@sina.com

体后背景环境. 而变化检测分析的墙体抑制杂波方法无法检测静态物体 [12]. 此外, 一些算法在墙体杂波的抑制中取得了一定的研究效果 [13-15]. 其中奇异值分解法 (SVD) 计算量小, 复杂度低, 却不能检测到低介电常数的目标; 子空间投影法 (subspace projection) 是通过比较墙体杂波和目标回波信号之间的大小差异来抑制墙体杂波的. 通过特征值分析, 能够将目标子空间与杂波子空间进行分离. 该类算法仅在无干扰、天线测量频率相同的理想情况下有效. 与已有的墙体杂波抑制算法 [15-18] 比较, Raffaele Solimene 等学者提出了一种基于熵值的算法 [19], 能够有效地抑制了墙体杂波. 该算法是利用墙体和目标的差异来设置适宜的阈值, 滤除墙体杂波. 因此, 在该算法中, 无需估计墙体参数, 而且也不会滤除目标信号. 此外, 该算法有效地避免了目标散射场的滤除. 然而, 该算法的问题在于门限可调范围受限, 且需要对成像区域进行多次扫描, 使得穿墙成像过程较为复杂.

为了实现更为简单有效的超宽带穿墙雷达目标检测, 获得精度更高的成像, 本文提出了一种基于扩展信源熵值的墙体杂波抑制新方法. 首先基于文献 [19] 的思想, 将回波信号离散化, 计算离散信源的概率空间. 然后在此基础上对该离散信源进行扩展, 计算得到扩展后新信源的熵值, 根据墙体杂波熵值与目标信号熵值的差异设定门限, 自适应选取最佳门限调节因子, 对回波信号进行杂波抑制处理. 利用处理后的数据进行后向投影成像. 最后以基于 FDTD 的仿真软件 GprMax2 D/3 D 所获得的穿墙雷达数据进行仿真实验, 并对结果进行了对比和分析.

2 穿墙雷达成像模型

Yee 于 1966 年提出的时域有限差分方法 (FDTD), 是将 Maxwell 方程在时间和空间上差分, 交替计算磁场和电场, 以此来模拟电磁场在时空中的变化. 该方法能够模拟场的分布, 且精度较高. 基于时域有限差分法, Antonis Giannopoulos 公开了仿真软件 GprMax2D/3D [20]. 本文利用该仿真软件获取穿墙雷达数据, 对所提出的算法进行验证.

2.1 场景建模

穿墙雷达探测建模如图 1 所示. 墙体厚度为 d , 相对介电常数为 ϵ_r . 目标为理想电导体, 置于两层

墙体之间, 其半径为 r , 圆心与前墙体之间的垂直距离为 δ . 全向天线与前墙体之间的垂直距离为 h , 沿着平行于墙体的测线等间距扫描 N 次. 发射天线发射超宽带窄脉冲信号, 接收天线在相同的位置接收回波信号.

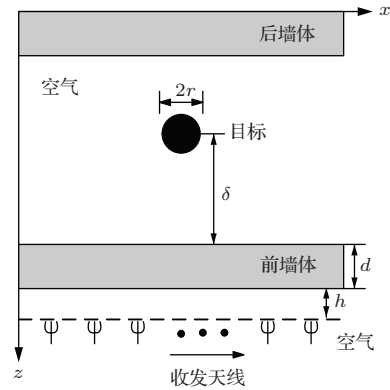


图 1 穿墙雷达探测模型

Fig. 1. Model of TWR detection.

2.2 发射信号模型

本文所使用的发射信号为 Ricker 子波, 即一阶高斯脉冲信号取负, 其表达式如下:

$$s(t) = -2\zeta\sqrt{e^{1/(2\zeta)}} e^{-\zeta(t-\chi)^2} (t-\chi), \quad (1)$$

其中, $\zeta = 2\pi^2 f_0^2$, $\chi = 1/f_0$, f_0 为中心频率. 本文中, 取 $f_0 = 1.5$ GHz. 发射信号的时域和频域波形图如图 2 所示.

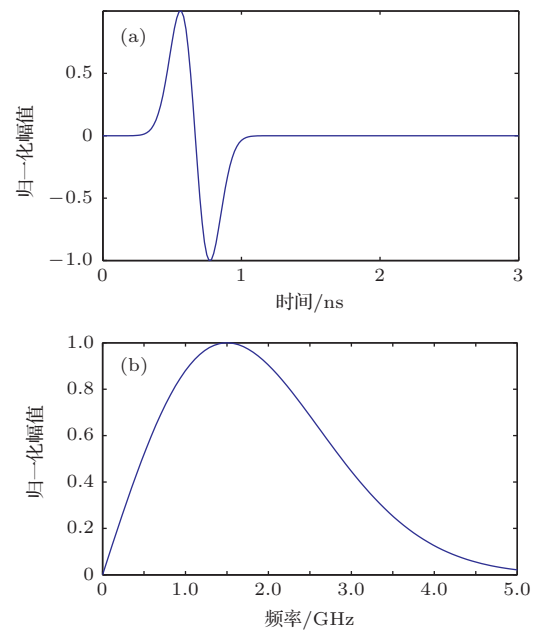


图 2 发射信号 (a) 时域波形图; (b) 频域波形图

Fig. 2. The emission signal: (a) time-domain waveform; (b) frequency-domain waveform.

2.3 回波信号模型

天线接收的回波信号模型表示如下^[19]:

$$e(t) = e_a(t) + e_w(t) + e_t(t), \quad (2)$$

其中, $e_a(t)$ 为天线失配造成的噪声信号, $e_w(t)$ 为墙体的强反射信号, 而 $e_t(t)$ 即为所要得到的目标反射信号. 在本文中, 假定全向天线为理想天线, 因而不存在噪声信号, 即 $e_a(t) = 0$. 可见, 为了实现精确成像, 必须通过算法消除墙体杂波信号 $e_w(t)$.

对 N 组回波信号分别进行采样, 记采样次数为 M . 回波信号数据可组成 $M \times N$ 维的矩阵 e

$$e = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M]^T. \quad (3)$$

其中, $\alpha_i = [e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{iN}]$, $i = 1, 2, \dots, M$ 表示各接收天线在同一采样点 i 时刻接收到回波信号的强度.

3 墙体杂波抑制算法

在信源离散情况下, 有限维概率空间可表示如下^[21]:

$$\begin{bmatrix} X \\ P(X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1, & a_2, & \dots, & a_n \\ P(a_1), & P(a_2), & \dots, & P(a_n) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

这里, $a_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 记为概率空间的信源元素, 其概率为 $P(a_k)$. 上式可表示为离散无记忆信源的数学模型, 其满足完备集条件

$$\sum_{k=1}^n P(a_k) = 1, P(a_k) \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

利用信息熵表示信源的平均不确定度, 其定义如下:

$$H(X) = - \sum_{k=1}^n P(a_k) \log P(a_k). \quad (6)$$

本文中, 以离散的回波信号作为信源. 天线在不同扫描位置发射电磁波信号, 墙体物理后向散射特征基本不变, 目标物理后向散射特征变化较大, 即接收到杂波的强度变化较小, 而接收到目标回波信号的强度变化较大. 根据最大离散熵定理^[22], 当离散信源各元素等概率出现的情况下, 信源熵将取得最大值. 从熵值物理意义出发, 即天线各扫描位置接收到的墙体杂波的平均不确定性要高于所感兴趣目标信号的平均不确定性, 因此墙体杂波的熵值要大于目标信号的熵值, 这就为区别墙体杂波与目标回波提供了理论基础. 为了进一步增大墙体杂波熵

值与目标回波熵值之间的差值, 同时减少天线阵元扫描的次数, 本文提出了一种基于扩展离散无记忆信源熵值的算法. (3) 式中 α_i 的各元素 $e(i, j)$ 所对应的概率 $q(i, j)$ 可通过如下计算得到

$$q(i, j) = \frac{e(i, j)^2}{\sum_{K=1}^N e(i, K)^2},$$

$$i = 1, 2, \dots, M;$$

$$j = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

上式中, $\sum_{j=1}^N q(i, j) = 1, i = 1, 2, \dots, M$. 因而, 可以将 α_i 作为一信源, 其概率空间表示如下:

$$\begin{bmatrix} Y_i \\ P(Y_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{iN} \\ q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iN} \end{bmatrix},$$

$$i = 1, 2, \dots, M. \quad (8)$$

根据 (6) 式计算其熵值, 可得

$$H(Y_i) = - \sum_{j=1}^N q_{ij} \log(q_{ij}),$$

$$i = 1, 2, \dots, M, \quad (9)$$

然后, 对 Y_i 其进行 L 次扩展, 扩展后其数学模型为 Y_i 空间的 L 重空间

$$\begin{bmatrix} Y_i^L \\ P(Y_i^L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{iN^L} \\ Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{iN^L} \end{bmatrix},$$

$$i = 1, 2, \dots, M, \quad (10)$$

此时, $E_{iJ} (J = 1, 2, \dots, N^L)$ 即为扩展信源 Y_i^L 中的元素, 对应于由 L 个 e_{ij} 组成的序列

$$E(i, J) = (e_{ij_1}, e_{ij_2}, \dots, e_{ij_L}), \quad (11)$$

而 $Q(i, J)$ 表示 E_{iJ} 的概率, 由如下方程求得:

$$Q(i, J) = q_{ij_1} \cdot q_{ij_2} \cdot \dots \cdot q_{ij_L}, (j_1, j_2, \dots, j_L = 1, 2, \dots, N), \quad (12)$$

其熵值即为

$$H(Y_i^L) = - \sum_{J=1}^{N^L} Q(i, J) \log(Q(i, J)),$$

$$i = 1, 2, \dots, M, \quad (13)$$

离散无记忆信源 Y_i 的 L 次扩展信源的熵值等于离散信源 Y_i 的熵值的 L 倍^[21], 即

$$H(Y_i^L) = L \cdot H(Y_i). \quad (14)$$

由于墙体杂波所对应的熵值较大, 而目标信号所对应的熵值较小, 因此, 可以通过设定门限 $Z(i)$ 来消除墙体杂波, 即

$$e_z(i, j) = Z(i) \cdot e(i, j), \quad (15)$$

其中, $e_z(i, j)$ 为处理后的回波数据, 而 $Z(i)$ 可定义为

$$Z(i) = \begin{cases} 0, & H(Y_i^L) \geq \beta \log(N^L), \\ 1, & \text{其他}, \end{cases} \quad (16)$$

式中, $\log N^L$ 为熵值 $H(Y_i^L)$ 的最大值, 可以通过因子 β 调节门限, 其调节范围为 $(0, 1)$. 显然, 根据本文提出的算法, 熵值扩大 L 倍, 同时门限可调节范围也相应地增大.

4 实验与结果分析

根据图 1 所示建立系统模型, 通过时域有限差分方法模拟仿真超宽带穿墙雷达成像场景. 具体建模过程如下.

全向天线放置于距离墙体 $h = 0.05$ m 处, 平行墙体等间距扫描 N 次, 扫描范围为 $0.1\text{--}2.1$ m. 墙体是均匀介质, 其厚度为 $d = 0.2$ m, 相对介电常数为 $\epsilon_r = 6.4$. 目标为圆形的理想电导体, 其圆心距离墙体 $\delta = 1.0$ m, 位于方位向的中点, 半径 $r = 0.1$ m. 全向天线的发射信号如 2.2 节所述. 通过基于 FDTD 算法的 GprMax2D/3D 软件仿真获取各个测量位置的回波信号.

通过墙体杂波抑制处理后, 利用后向投影方法 (back projection, BP) 重建成像场景. 将成像场景进行离散化, 其中沿 x 轴方向点数为 X , 沿 z 轴方向点数为 Z , 则成像区域的成像点总数为 $X \times Z$. 为了方便比较墙体杂波抑制的效果, 现定义目标-杂波比 (target-to-clutter ratio, TCR) 如下 [23]:

$$\text{TCR} = \frac{\frac{1}{N_t} \sum_{u \in A_t} I(u)}{\frac{1}{N_c} \sum_{u \in A_c} I(u)}. \quad (17)$$

其中, $I(\cdot)$ 为成像点所对应的归一化幅度值; A_t 和 A_c 分别为目标区域和杂波区域, 而 N_t 和 N_c 为各区域所对应的成像点数目.

实验 1 当 $N = 26$ 时, 分别考虑 $L = 1$ 和 $L = 2$ 的情况. 图 3 给出了两种情况下的熵值. 当 $L = 1$ 时, 为文献 [19] 所提出的基于熵值的杂波抑制方法. 对比图 3(a) 和 (b) 可以发现, 利用本文所

述方法处理后, 熵值扩大了 2 倍, 同样, 墙体杂波熵值与目标信号熵值的也扩大了 2 倍, 即扩大了门限可调节范围.

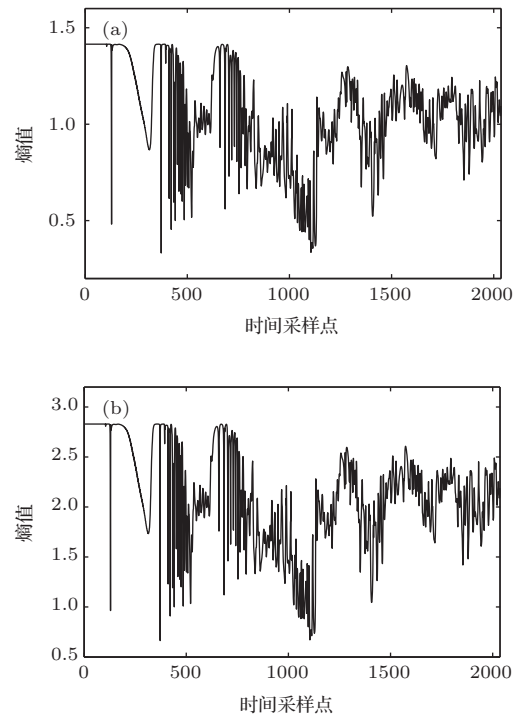


图 3 各时间采样点的熵值 (a) $N = 26, L = 1$; (b) $N = 26, L = 2$
Fig. 3. Entropy of each temporal sampling point: (a) $N = 26, L = 1$; (b) $N = 26, L = 2$.

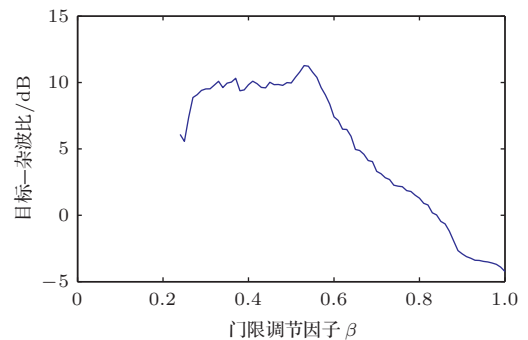


图 4 TCR 随 β 变化曲线 ($L = 1$)
Fig. 4. Variation curve of TCR with β ($L = 1$).

为了获取最佳输出目标图像, 使得 TCR 达到最大值, 令 β 从 0 到 1 取值, 步长为 0.01, 自适应选取最佳门限调节因子 β^* . 以 $L = 1$ 时为例, TCR 随 β 变化的曲线图如图 4 所示. 由图可知, 当 β 取值小于 0.23 时, 回波数据完全被滤除, 无法计算 TCR, 因此图中曲线部分缺失; 当 $\beta = 1$ 时, 对应于原始数据输出目标图像的 TCR, 即墙体杂波未经抑制处理, 其成像如图 5 所示. 确定 β^* 后, 对原始数据

进行杂波抑制处理, 并且通过BP方法成像, 输出目标图像如图6(a)所示. 计算可得, 未经杂波抑制处理时, 即当 $\beta = 1$ 时输出目标图像的TCR为 -4.24 dB, 而杂波抑制处理之后输出目标图像的TCR为 11.27 dB, 对应增量 ΔTCR 为 15.51 dB. 当 $L = 2$ 时, 自适应选取 β^* 后, 对原始数据进行杂波抑制处理, 并且通过BP方法成像, 输出目标图像如图6(b)所示. 计算可得, 未经杂波抑制处理时输出目标图像的TCR为 -7.71 dB, 杂波抑制处理之后输出目标图像的TCR为 11.28 dB, 则对应增量 ΔTCR 达到 18.99 dB. 通过比较图6(a)和(b)可知, 本文提出方法的杂波抑制效果要优于文献[19]方法的杂波抑制效果, 而数据对比也证明了这一结论.

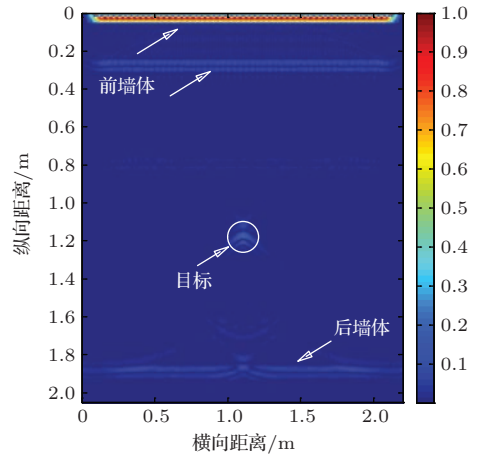


图5 原始信号成像图

Fig. 5. Imaging of original signal.

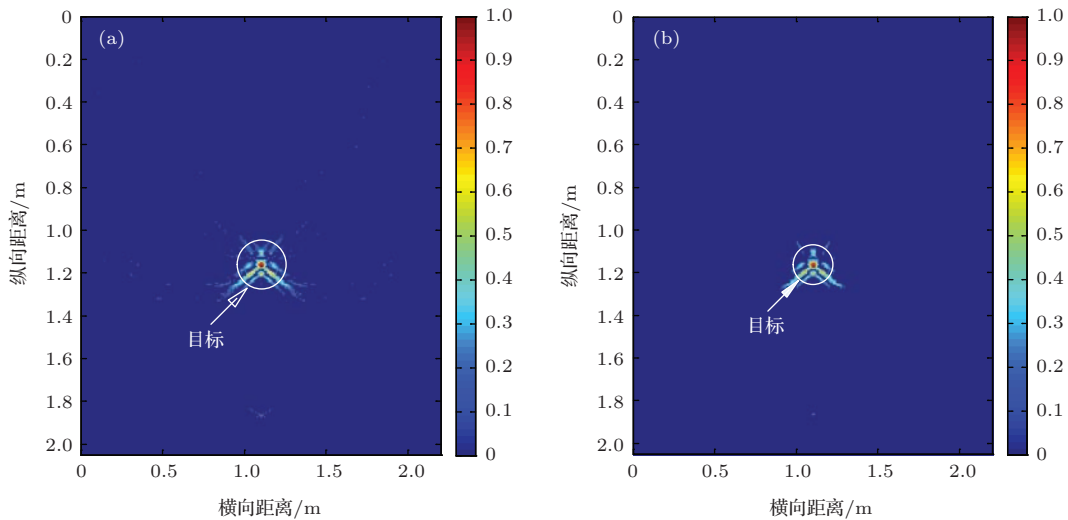


图6 杂波抑制后成像图 (a) $N = 26, L = 1$; (b) $N = 26, L = 2$

Fig. 6. Imaging after clutter mitigation: (a) $N = 26, L = 1$; (b) $N = 26, L = 2$.

实验2 为了说明本文方法能够有效减少天线扫描次数, 同时保持高质量成像, 将文献[19]方法在天线扫描次数 $N = 51$ 的情况与本文提出方法 $N = 26, L = 3$ 的情况进行了对比. 图7分别为两种情况所对应的熵值. 计算TCR, 选取最佳门限调节因子, 图8给出了两种算法的成像结果. 而通过计算可知, 前者未经杂波抑制处理时输出目标图像的TCR为 -2.17 dB, 杂波抑制处理之后输出目标图像的TCR为 13.55 dB, 对应增量 ΔTCR 为 15.72 dB; 后者未经杂波抑制处理时输出目标图像的TCR为 -8.46 dB, 杂波抑制处理之后输出目标图像的TCR为 11.28 dB, 对应增量 ΔTCR 达到

19.74 dB. 通过比较可以看出, 在扫描次数较少的情况下, 本文算法随着扩展次数的增加, TCR将明显大于文献[19]方法的TCR.

表1给出了不同扫描次数及扩展次数的TCR比较. 实验结果表明, 当扫描次数固定时, 随着扩展次数的增加, 增量 ΔTCR 也会不断增大, 即证明了本文方法的墙体杂波抑制效果优于文献[19]方法的效果. 而实验2的结果证明了, 本文方法能够在保持成像效果的前提下, 有效地减少天线所需扫描次数, 大大降低了穿墙成像雷达在实际应用中的难度.

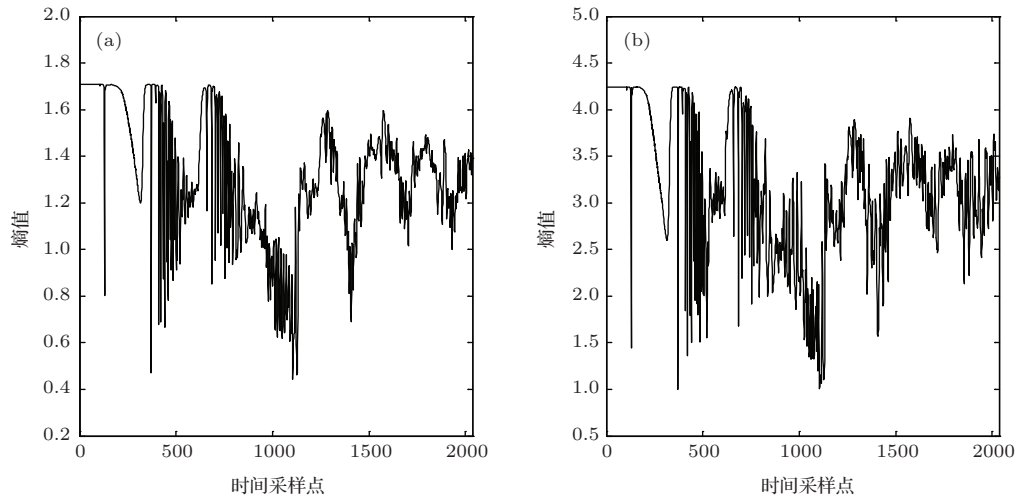


图7 各时间采样点的熵值 (a) $N = 51, L = 1$; (b) $N = 26, L = 3$

Fig. 7. Entropy of each temporal sampling point: (a) $N = 51, L = 1$; (b) $N = 26, L = 3$.

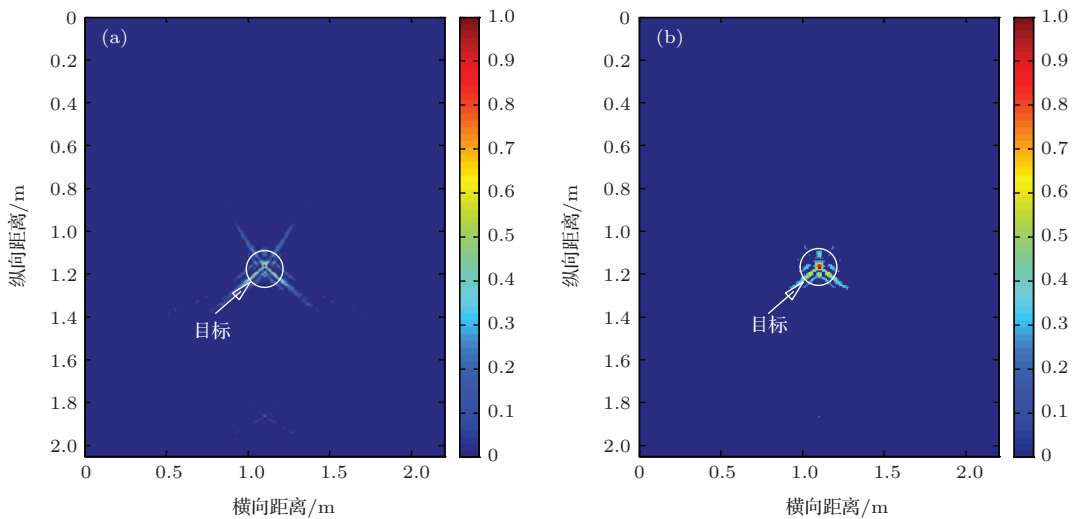


图8 杂波抑制后成像图 (a) $N = 51, L = 1$; (b) $N = 26, L = 3$

Fig. 8. Imaging after clutter mitigation: (a) $N = 51, L = 1$; (b) $N = 26, L = 3$.

表1 不同扫描次数及扩展次数的TCR比较

Table 1. TCR of various times of scan and source expansion.

| | $N = 51, L = 1$ | $N = 26, L = 1$ | $N = 26, L = 2$ | $N = 26, L = 3$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 处理前 TCR/dB | -2.17 | -4.24 | -7.71 | -8.46 |
| 处理后 TCR/dB | 13.55 | 11.27 | 11.28 | 11.28 |
| Δ TCR/dB | 15.72 | 15.51 | 18.99 | 19.74 |

本文方法的计算复杂度可表示为 $O(M \cdot N^L)$, 其中 N 为天线扫描次数, M 为采样次数, L 为信源扩展次数. 当信源扩展次数 $L = 1$ 时, 该方法即为基于信源熵值的杂波抑制方法, 则其计算复杂度可表示为 $O(M \cdot N)$. 可见随着 L 的增加, 计算复杂度呈指数增长, 因此降低计算复杂度, 提高计算效率

将是后续研究的方向之一.

5 结 论

鉴于墙体杂波熵值与目标信号熵值的差异, 结合扩展信源熵值理论, 提出了一种基于超宽带穿墙

成像雷达的墙体杂波抑制的方法. 利用该杂波抑制方法, 自适应选取最佳门限调节因子进行滤波处理, 结合BP方法成像后计算目标杂波比, 并与基于信源熵值的杂波抑制方法的成像结果进行了比较. 结果表明, 在测量方式相同的情况下, 前者的杂波抑制效果(输出目标-杂波比增量为19.74 dB)要优于后者的杂波抑制效果(输出目标-杂波比增量为15.51 dB), 并且基于扩展信源熵值的杂波抑制方法能够在保证成像效果的前提下减少天线扫描次数, 降低了穿墙雷达成像的复杂度. 此外, 当信源扩展次数 $L = 1$ 时, 该方法即为基于信源熵值的杂波抑制方法, 因此该方法可视为基于信源熵值的墙体杂波抑制方法的一般形式. 该方法对穿墙成像雷达理论研究和实际工程应用有一定的参考价值.

参考文献

- [1] Zhao X L, Kang X, Chen L, Zhang Z B, Liu J L, Ouyang X P, Peng W B, He Y N 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 098502 (in Chinese) [赵小龙, 康雪, 陈亮, 张忠兵, 刘金良, 欧阳晓平, 彭文博, 贺永宁 2014 物理学报 **63** 098502]
- [2] Yuan J R, Huang H B, Deng X H, Liang X J, Zhou N G, Zhou L 2015 *Chin. Phys. B* **24** 048501
- [3] Wu S Y, Ding Y P, Chen C, Xu Y Y, Fang G Y, Yin H J 2012 *Journal of Electronics & Information Technology* **34** 1277 (in Chinese) [吴世有, 丁一鹏, 陈超, 徐艳云, 方广有, 阴和俊 2012 电子与信息学报 **34** 1277]
- [4] Demollaian M, Sarabandi K 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46** 1589
- [5] Solimene R, Soldovieri F, Prisco G, Pierri R 2009 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **47** 1310
- [6] Wang F F, Zhang Y R 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 084101 (in Chinese) [王芳芳, 张业荣 2012 物理学报 **61** 084101]
- [7] Jia Y, Cui G L, Kong L J, Yang X B 2014 *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **11** 970
- [8] Chetty K, Smith G E, Woodbridge K 2012 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **50** 1218
- [9] Colone F, Pastina D, Falcone P, Lombardo P 2014 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **52** 3486
- [10] Amin M G, Estephan H 2009 *Proceedings of SPIE Orlando, Florida, USA, May, 2009* p6
- [11] Chang P C, Burkholder R J, Volakis J L 2010 *IEEE Trans. Antennas and Propagation.* **58** 155
- [12] Admin M G, Ahmad F 2013 *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **49** 1410
- [13] Zhao Z X, Kong L J, Ja Y, Li Z X 2014 *Radar Science and Technology.* **12** 51 (in Chinese) [赵中兴, 孔令讲, 贾勇, 李志希 2014 雷达科学与技术 **12** 51]
- [14] Gaikwad A N, Singh D, Nigam M J 2011 *IET. Radar, Sonar & Navigation.* **5** 416
- [15] Tivive F H C, Bouzerdoum A, Amin M G 2015 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **53** 2108
- [16] Yoon Y, Amin M 2009 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **47** 3192
- [17] Potin D, Dufflos E, Vanheeghe P 2006 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **44** 2393
- [18] Dehmollaian M, Thiel M, Sarabandi K 2009 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **47** 1289
- [19] Solimene R, Cuccaro A 2014 *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **11** 1158
- [20] GprMax2D/3D Users Guide, A Giannopoulso <http://www.xmarks.com/site/www.gprmax.org/> [2015-1-21]
- [21] Fu Z Y 2001 *Information Theory-Principles and Applications* (Beijing: Electronics Industry Press) pp38-40 (in Chinese) [傅祖芸 2001 信息论—基础理论与应用(北京: 电子工业出版社) 第22—40页]
- [22] Shore J E, Johnson R W 1980 *IEEE Trans. Inform. Theory.* **26** 26
- [23] Fok Hing Chi Tivive, Abdesselam Bouzerdoum, van Ha Tang 2014 *Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), 2014 IEEE 8th A Coruna, Spain, June 22-25, 2014* p48

A method of wall clutter removal for through-wall radar based on entropy of expanded antenna source*

Li Jia-Qiang^{1)3)†} Cai Hong-Yuan²⁾ Chen Jin-Li¹⁾²⁾ Li Peng²⁾³⁾ Ge Jun-Xiang¹⁾²⁾

1) (Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

2) (School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

3) (Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing 210044, China)

(Received 12 January 2015; revised manuscript received 12 May 2015)

Abstract

Strong front wall clutter has serious impacts on the target detection and imaging in the through-wall radar (TWR) system. A method of robust wall clutter suppression based on the entropy of an expanded antenna source for ultra-wide-band through-wall radar is presented in this paper. The model of TWR scenario consists of four layers. Assume that the first and the third layers are air space, while the second and the fourth layers are composed of uniform flat concrete wall. The circular target, assumed to be a perfect electric conductor, is located in the third layer. Along the measurement line which is parallel to the front wall, the transceiver antenna scans uniformly. The echo signals that come from the target and walls are processed into discrete data at first, so that the calculation of probability space is subsequently implemented and the discrete data are expanded as well. And then the entropy of the expanded data that contain robust wall clutter and echo of target is calculated. Taking into consideration the amplitude of target signal varying in each scan, while that of clutter signal is not, it is evident that the entropy can be utilized to discriminate the signals between the target and wall. According to the difference between the entropy of the wall clutter and that of the target, a certain threshold can be set and the optimum tolerance threshold is adaptively selected on the basis of target-to-clutter ratio. With the optimum tolerance threshold, process of clutter suppression is conducted. Finally, back projection is employed for imaging of target. In this paper, data of through-wall radar for simulation are provided by GprMax2D/3D, based on the finite difference-time domain method. The clutter suppression and imaging are separately conducted by the method based on data entropy and the method proposed in this paper. Comparing the results of simulations, it is shown that the gain of target-to-clutter ratio for the former is 15.51 dB, and that for the latter is 19.74 dB. It is obvious that the proposed method can provide imaging with higher quality for the same measurement, and it requires fewer scans with the same quality of imaging as well. Computational complexity of the proposed method and the method based on entropy can be expressed as $O(M \cdot N^L)$ and $O(M \cdot N)$, respectively

Keywords: clutter removal, through-wall radar, entropy of extended source, adaptive threshold

PACS: 84.40.Xb, 93.85.Bc, 95.75.Rs

DOI: 10.7498/aps.64.198402

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61372066, 61302188), the Natural Science Foundation of Jiangsu province, China (Grant No. BK20131005), and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions.

† Corresponding author. E-mail: ljiaqiang@sina.com