

文章编号: 2096-1618(2020)01-0026-05

## CS-TWR 多径模型及快速搭建方法

夏朝禹<sup>1,2</sup>, 高瑜翔<sup>1,2</sup>, 郭春妮<sup>1,2</sup>, 包兆华<sup>1,2</sup>

(1. 成都信息工程大学通信工程学院, 四川 成都 610225; 2. 气象信息与信号处理四川省高校重点实验室, 四川 成都 610225)

**摘要:** 针对压缩感知穿墙雷达 (CS-TWR) 中, 基于斯涅尔定律的多径时延估计算法复杂度高、计算量大等问题。依据电磁波在墙体中传播的几何路径, 推导出一种有效且快捷的多径时延估计算法, 用于快速建立多径通路模型, 以减少成像耗时。将所提算法的估计时延应用于过完备字典建立, 通过分段弱正交匹配追踪能够反演出无虚像的 B-scan 图, 从而验证所提算法的有效性 & 准确性。并通过实验证明, 所提时延估计算法比传统斯涅尔定律约快 4 倍。

关 键 词: 压缩感知; 穿墙雷达; 斯涅尔定律; 时延估计

中图分类号:TN951

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.01.005

## 0 引言

压缩感知穿墙雷达 (compressed sensing through the wall radar, CS-TWR) 成像过程中, 电磁波经过目标并经过壁面反射将产生多条路径, 这些路径具有不同的时间延迟, 导致电磁能量聚集在不同于目标的像素上, 进而产生虚假目标<sup>[1-4]</sup>。目前, 基于测量矩阵组合法<sup>[5]</sup>和图像非相干融合法<sup>[6]</sup>被广泛用于抑制多径虚像的产生。上述两类算法都需要构造相应多径通路的完备字典, 而目标时延信息是构造过完备字典的先验条件之一。但是传统斯涅尔定律的多径时延估计算法存在计算量大、计算难度高等问题<sup>[7]</sup>。电磁波经墙体右壁的一条多径通路如图 1 所示, 利用斯涅尔定律估计其单程传播时延, 方程如下:

$$l_1 = \frac{dy}{\cos(\theta_1)}$$

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \sqrt{Er}$$

$$l_2 = \sqrt{X_{lm}^2 + X_B^2 - l_1^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_2)} - l_1 \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$l_1 \times \sin(\pi - \theta_1 + \theta_2) = \sqrt{X_{im}^2 + X_B^2} \times \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_3 - \theta_2)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left[ \frac{l_1}{\sqrt{X_{lm}^2 + X_B^2}} \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] - \theta_2$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left[ \frac{2D_w - X_Q - X_{tm}}{\sqrt{X_{tm}^2 + X_B^2}} \right]$$

$$l_3 = \sqrt{X_A^2 + (2D_w - X_O)^2 - l_2^2 \sin^2(\theta_2 - \theta_1)} - l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$\tau = \frac{l_1 + l_3 + l_2 \times \sqrt{Er}}{C} \quad (1)$$

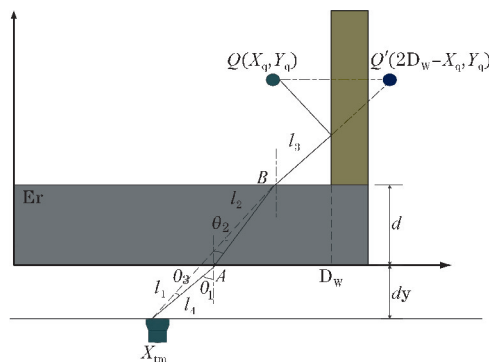


图1 右墙壁多径通路几何图

由上可见,单种类单程多径传播时延的计算由8个超越方程组成,计算量巨大;并且传统估计方法还将电磁波在墙体表面的入射角 $\theta_1$ 作为先验条件之一,这在工程中是很难实现的。因此为减少过完备字典构建耗时,考虑实际操作的便利性,提出一种快速多径时延估计算法。该算法能够以极快的速度对任意情况下的多径通路进行精确时延补偿。

## 1 基于测量矩阵组合法的多径抑制模型

考虑具有  $N$  个天线位置和  $M$  个频率的步进频 CS 成像系统,并且在此场景中有  $S$  个感兴趣的目标。在第  $n$  个天线和第  $m$  个频率接受信号为

$$\mathbf{Z}[n, m] = \sum_{p=0}^S \boldsymbol{\sigma}_p \exp[-j2\pi f_m \tau_{n,m}] \quad (2)$$

将  $\mathbf{Z}[n, m]$  拼接成一维向量  $\mathbf{Z}_{(n-1)M+m}^{p-0}$ , 则过完备字典

$$A_{(n-1)M+m}^0 = G^2 \exp[-j4\pi f_m \tau_{A_{n,m}}] \quad (3)$$

$A^0$  表示真实目标通路的过完备字典, 要消除虚像, 需要构造各个多径通路对应的过完备字典:

$$\mathbf{A}_{(n-1)M+m}^1 = G_A G_B \exp[-j2\pi f_m(\tau_{A_{n-m}} + \tau_{B_{n-m}})]$$

$$\mathbf{A}_{(n-1)M+m}^2 = G_A G_C \exp[-j2\pi f_m(\tau_{A_{n-m}} + \tau_{C_{n-m}})]$$

$$\begin{aligned}
A_{(n-1)M+m}^3 &= G_A G_D \exp[-j2\pi f_m(\tau_{An,m} + \tau_{Dn,m})] \\
&\vdots \\
A_{(n-1)M+m}^{R-1} &= G_A G_R \exp[-j2\pi f_m(\tau_{An,m} + \tau_{Rn,m})] \quad (4)
\end{aligned}$$

$G_A, G_B, \dots, G_R$  为各条路径的衰减常数, 设置测量矩阵  $\Phi$ , 通过求解下列方程可得到场景信息:

$$\begin{aligned}
Z &= \tilde{A}\sigma = A^0\sigma + A^1\sigma + A^2\sigma + \dots + A^{R-1}\sigma \\
\tilde{A} &= \Phi[A^0 + A^1 + \dots + A^{R-1}] \\
\hat{\sigma} &= \operatorname{argmin} \|x\|_1 \quad \text{s. t. } Z = \tilde{A}x \quad (5)
\end{aligned}$$

## 2 快速时延估计算法

基于上述多径抑制模型, 需要将每条多径时间延迟  $\tau_{n,m} = [\tau_{An,m}, \tau_{Bn,m}, \dots, \tau_{Rn,m}]$  作为先验信息。若利用传统时延估计算法, 则需要大量时间, 复杂的方程组也对硬件的实现造成挑战<sup>[8]</sup>。因此, 提出了一种快速多径时延估计算法, 针对不同种类的多径归纳分析, 给出了不同的快速实现方程组。首先分析右壁多径情况, 如图 2 所示。

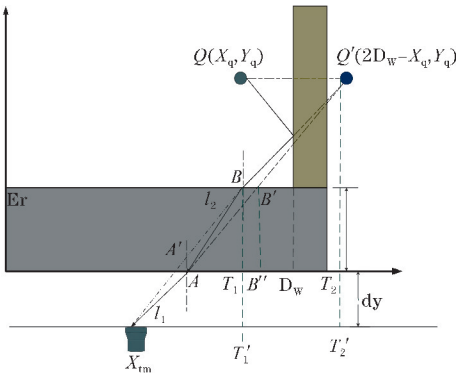


图 2 右墙壁快速多径通路几何图

作目标点  $Q$  的镜面对称点  $Q'$ , 连接  $AQ'$ 、 $X_{tm}B$ , 与

墙体界面交于点  $A'$  和  $B'$ 。作  $B$  和  $Q'$  点关于阵列水平的垂线, 垂点分别为  $T_1'$  和  $T_2'$ , 与墙体前表面的垂点为  $T_1$  和  $T_2$ ,  $X_{tm}$  与墙面的距离为  $dy$  则根据  $\Delta BA'T_1 \sim \Delta BT_1X_{tm}$ 、 $\Delta B'AB'' \sim \Delta Q'AT_2$  可得到下面组方程:

$$\begin{aligned}
d[X_B - X_{tm}] &= [dy + d] \times [X_B - X_{A'}] \\
[X_{B'} - X_A] \times Y_Q &= d \times [2D_w - X_Q - X_A] \\
\frac{X_B - X_{A'}}{X_B - X_A} &= \sqrt{Er} \\
\frac{X_{B'} - X_A}{X_B - X_A} &= \sqrt{Er} \quad (6)
\end{aligned}$$

通过求解  $X_A$  和  $X_B$ , 则即可获得  $l_1$ 、 $l_2$  和  $l_3$ , 时延估计为

$$\tau = \frac{l_1 + l_3 + l_2 \times \sqrt{Er}}{C} \quad (7)$$

与传统的 8 组超越方程相比, 此方法无高阶项, 并且方程数目较少, 因此计算复杂度远远低于传统方式。不考虑高阶多径的情况下, 多径通路传播类型大致分为地板、天花板、空间壁面经反射到达接收机的路径<sup>[9-10]</sup>, 如图 3 所示。

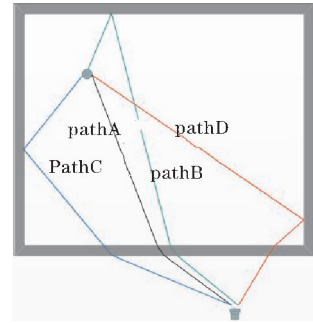


图 3 多径种类

PathA, PathB, PathC, PathD 4 条路径两两组合成多条通路, 不失一般性, 可作以下归纳分析, 如图 4, 表 1~2 所示。

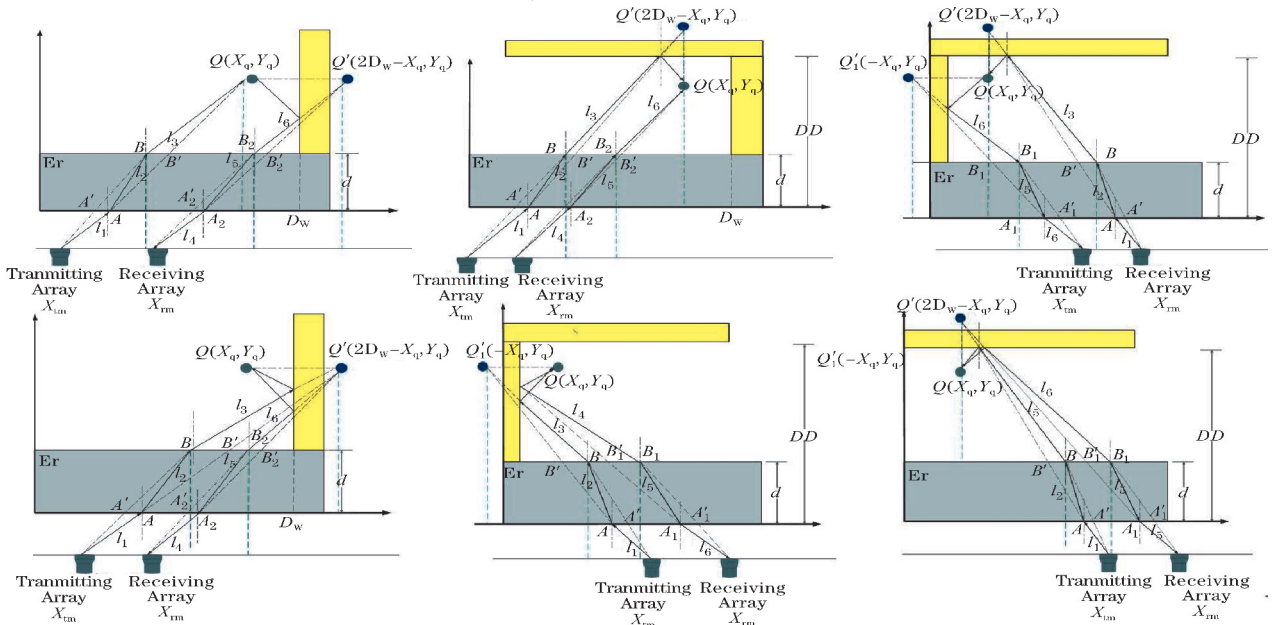


图 4 各种类的多径通路

表 1 各种类多径传播通路的时延组成

传播模型	A	B	C	D	E	F
时延组成	$\tau+\tau_L$	$\tau+\tau_T$	$\tau_R+\tau_L$	$\tau_L+\tau_{L'}$	$\tau_R+\tau_{R'}$	$\tau_T+\tau_{T'}$

表 2 时延种类及其求解方程组

时延种类	$\tau$	$\tau_L \setminus \tau_R$	$\tau_T$
求解方程	$\frac{X_B-X_{im}}{dy+d}=\frac{X_B-X_{A'}}{d}$	$\frac{X_B-X_{im}}{dy+d}=\frac{X_B-X_{A'}}{d}$	$\frac{X_B-X_{im}}{dy+d}=\frac{X_B-X_{A'}}{d}$
	$\frac{X_{B'}-X_A}{d}=\frac{X_Q-X_A}{Y_Q}$	$\frac{X_{B'}-X_A}{d}=\frac{2D_w-X_Q-X_A}{Y_Q}$	$\frac{X_{B'}-X_A}{d}=\frac{X_Q-X_A}{2DD-Y_Q}$
	$\frac{X_B-X_{A'}}{X_B-X_A}=\sqrt{Er}$	$\frac{X_B-X_{A'}}{X_B-X_A}=\sqrt{Er}$	$\frac{X_B-X_{A'}}{X_B-X_A}=\sqrt{Er}$
	$\frac{X_{B'}-X_A}{X_B-X_A}=\sqrt{Er}$	$\frac{X_{B'}-X_A}{X_B-X_A}=\sqrt{Er}$	$\frac{X_{B'}-X_A}{X_B-X_A}=\sqrt{Er}$

3 分段弱正交匹配追踪迭代成像

CS-TWR 中的场景重构准确性高度依赖于恢复算法,为使过完备字典有限等距性条件(restricted isometry property, RIP)更加松弛<sup>[11-13]</sup>,选用分段弱正交匹配追踪算法(segmentation-weak orthogonal matching pursuit, SWOMP)对式(5)进行稀疏迭代求解<sup>[14-15]</sup>:

- (1) 设 **res** 为信号迭代残差;变量  $\alpha, t=1$ ;设置迭代次数  $S$ ;  $\mathbf{A}_t$  表示索引集,其初始值为  $\mathbf{A}_0=\boldsymbol{\phi}$ ;  $\mathbf{A}_t$  表示按索引  $\mathbf{A}_t$  选出矩阵  $\mathbf{A}$  的列集合,设初始值  $\mathbf{A}_0=\boldsymbol{\phi}$ ;
- (2) 计算  $u=\langle \mathbf{A}^T \mathbf{res}_{t-1} \rangle, 1 \leq j \leq N$ , 设置阈值  $th=\alpha \cdot \max(u)$ , 选出  $u \geq th$  的值,并将这些值对应  $\mathbf{A}$  的列序号  $j$  构成集合  $\mathbf{J}_0$ , 用  $\mathbf{a}_j$  表示  $\mathbf{A}$  的第  $j$  列,  $\|\mathbf{res}\|_2$  为残差 **res** 的  $l_2$  范数;
- (3) 更新索引集  $\mathbf{A}_t=\mathbf{A}_{t-1} \cup \mathbf{J}_0, \mathbf{A}_t=\mathbf{A}_{t-1} \cup \mathbf{a}_j$ ;
- (4) 求  $\mathbf{y}=\mathbf{A}_t \boldsymbol{\theta}_t$  的最小二乘解:
$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_t=[\mathbf{A}_t^T \times \mathbf{A}_t]^{-1} \times \mathbf{A}_t^T \times \mathbf{y};$$
- (5) 更新残差  $\mathbf{res}=\mathbf{y}-\mathbf{A}_t \times \hat{\boldsymbol{\theta}}_t$ ;
- (6)  $t=t+1$ , 如果  $t \leq S$ , 则返回第二步, 如果  $t > S$  则停止迭代, 输出  $\hat{\boldsymbol{\theta}}=\hat{\boldsymbol{\theta}}_t$ ;
- (7) 最终可得重构场景  $\hat{\mathbf{X}}=\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 。

4 仿真实验及结果分析

为了验证所提算法的有效性,进行如下仿真实验:首先利用步进频信号收集 TWR 回波数据,然后,根据场景信息估算时延建立过完备字典,最后通过 SWOMP 算法进行稀疏求解:

- (1) 步进频波形中心频率为 1.5 GHz, 带宽为 500 Hz, 步进数为 32;
- (2) 将成像区域设置为长 1 m, 宽 1 m 的密闭几何空间, 设场景中心为坐标原点。在此几何空间内部, 有 5 个静目标分别位于 (0 m, 0 m)、(-0.84 m, -0.84 m)、(-0.84 m, 0.84 m)、(0.84 m, -0.84 m)、(0.84 m, 0.84 m);
- (3) 采用 31 根收发一体天线组成阵列, 均匀分布于 (-1.5 m, 1.5 m) 处, 天

线阵列距离墙壁 0.5 m; (4) 假设墙体为单层介质, 并且均匀分布, 厚度为 0.3 m, 介电常数为 4.3 F/m; (5) SWOMP 参数设置:  $\alpha=0.7$ , 迭代次数  $S=30$ 。设置  $R=3, 6, 9$  条多径, 忽略高阶多径的影响,  $\boldsymbol{\Phi}$  矩阵设置为伯努利矩阵。

图 5 分别展示了 3 条不同的多径对成像造成的影响, 值得注意的是, 多径数目越多, 成像中的虚假目标数目随之增加, 从而会增加目标的辨识难度。

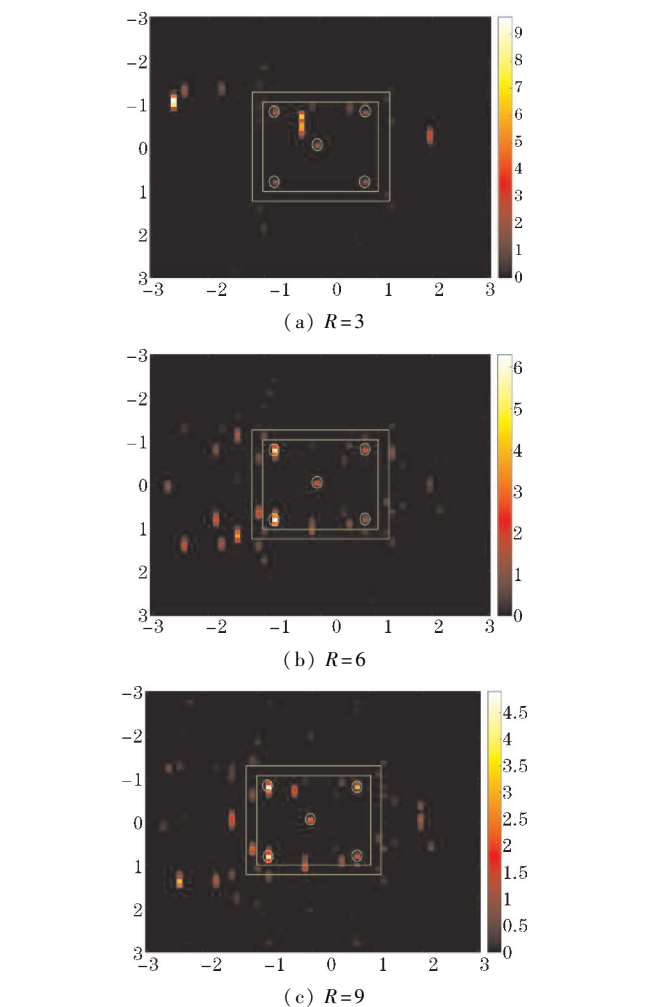


图 5 多径条数对成像的影响

建立  $R=6$  的多径通路模型,记录传统时延估计和快速时延估计算法平均建模耗时(进行 1000 次蒙特卡洛仿真实验),结果如表 3 所示。仿真中运用传统时延方式建模则需要 2.849 s,而运用快速时延算法缩短至 0.752 s,所提快速时延估计算法比传统估计算法约快 4 倍。建立各条多径通路对应的过完备字典,利用测量矩阵组合法进行虚像抑制,通过 SWOMP 进行稀疏求解,成像效果如图 6 所示,从图中可知,虚假目标被完全消除。

表 3  $R=6$  时,时延估计算法耗时比较

方法	传统时延估计	快速时延估计
耗时/s	2.849	0.752

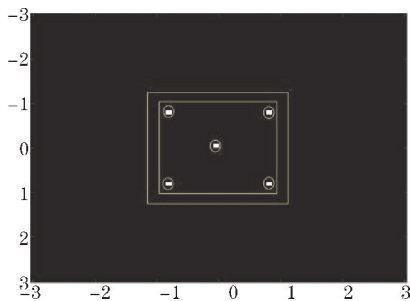


图 6 虚假目标抑制成像效果

5 结束语

针对传统多径时延估计算法计算量大、复杂度高等问题。利用电磁波传播的几何关系,根据三角形相似原理提出了一种快速多径时延估计算法。相比于传统斯涅尔定律时延估计算法,所提方法建立模型耗时仅为传统方法的 25%(以多径条数  $R=6$  为例)。并且所提算法不需要入射角作为先验信息,实际操作更简便,工程价值更高。通过对多径场景的仿真实验,结果无虚假目标产生,证明估计时延的准确性。

参考文献:

[1] Guo S, Cui G, Kong L, et al. Multipath Analysis and Exploitation for MIMO Through-the-Wall Imaging Radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(10): 3721–3731.

[2] Guo S, Yang X, Cui G, et al. Multipath ghost suppression for through-the-wall imaging radar via array rotating [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(6): 868–872.

[3] Setlur P, Smith G E, Ahmad F, et al. Target localization with a single sensor via multipath exploitation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(3): 1996–2014.

[4] 夏朝禹,高瑜翔,黄坤超,等. 基于组合滤波的压缩感知穿墙雷达杂波抑制[J]. 电讯技术, 2019, 59(10): 1186–1190.

[5] 陈曦. 穿墙雷达成像处理技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.

[6] Leigsnering M, Ahmad F, Amin M G, et al. Parametric dictionary learning for sparsity-based TWRI in multipath environments [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(2): 532–547.

[7] 葛薇,张照,彭正辉,等. 基于 SFCW 雷达的多场景墙体参数反演[J]. 电子测量技术, 2017, 40(5): 32–36.

[8] Leigsnering M, Ahmad F, Amin M G, et al. Compressive sensing-based multipath exploitation for stationary and moving indoor target localization [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2015, 9(8): 1469–1483.

[9] 朱江,李家强,朱艳萍,等. 基于透射系数的穿墙雷达墙体参数估计[J]. 现代雷达, 2018, 40(7): 74–78.

[10] 张华美,张业荣,王芳芳. 墙体参数未知时的穿墙雷达实时成像方法[J]. 电子学报, 2016, 44(7): 1613–1618.

[11] Korki M, Zhang J, Zhang C, et al. Iterative Bayesian reconstruction of Non-IID block-sparse signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(13): 3297–3307.

[12] Xia C Y, Yu J, Gao Y X, et al. Radar Imaging based on Orthogonal Matching Pursuit via Sparse Constraint[J]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019, 1237(3): 032006.

[13] Xia C Y, Gao Y X, Yu J, et al. Block-sparse signal recovery based on orthogonal matching pursuit via stage-wise weak selection [J]. Signal, Image and Video Processing, 2019: 1–9.

[14] Xia C, Gao Y, Yu J. A novel approach for Sparse Imaging of Through-wall Radar [J]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019, 1237(3): 032001.

[15] Mishali M, Eldar Y C. From theory to practice:

Sub-Nyquist sampling of sparse wideband analog signals [ J ]. IEEE Journal of selected topics in signal processing,2010,4(2):375–391.

CS-TWR Multipath Model and Fast Building Method

XIA Chaoyu<sup>1,2</sup>, GAO Yuxiang<sup>1,2</sup>, GUO Chunni<sup>1,2</sup>, BAO Zhaohua<sup>1,2</sup>

(1. College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;2. Meteorological Information and Signal Processing Key Laboratory of Sichuan Education Institutes, Chengdu 610225,China)

**Abstract:**For the compressive sensing through-the-wall radar (CS-TWR), multi-path time delay estimation algorithm based on Snell’s law is complex and computational intensive. Based on the geometric path of electromagnetic wave propagating in the wall, an effective and fast algorithm for estimating multipath time delay is deduced in this paper, which can be used to quickly establish multipath path model to reduce imaging time. Experiments show that the proposed fast time delay estimation algorithm is about 4 times faster than the traditional estimation algorithm. Through Segmentation-weak orthogonal matching tracking, the B-scan image without virtual image can be retrieved, thus verifying the effectiveness and accuracy of the proposed algorithm. And the proposed algorithm is applied to the establishment of over-complete dictionary.

**Keywords:**compressed sensing;throughthe wall radar;snell’s law;time delay estimation