

一种基于超宽带雷达的多观测点人体呼吸信号检测方法

姚思奇^{1,2,3} 吴世有^{1,2} 张经纬^{1,2,3} 叶盛波^{1,2} 方广有^{1,2}

(1. 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190;

2. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 3. 中国科学院大学 北京 100048)

摘 要: 基于超宽带生命探测雷达的障碍物穿透检测技术在灾难救援和反恐作战等非入侵式探测领域有着广泛的应用前景。目前国内外进行的研究大多采用单观测点放置雷达对目标进行检测,在低信噪比的条件下难以检测出生命体的位置。针对以上方法的局限性,采用多观测点放置雷达,将回波信号进行关联检测,得到生命体的空间位置,并进一步与已有的算法进行对比。仿真结果证明了该方法在低信噪比条件下的优越性,实验结果证明了该文提出的方法具有可行性,能够较为准确地检测出生命体位置。

关键词: 超宽带雷达;多观测点;低信噪比;关联检测

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Method for human respiration signal detection based on ultra-wideband radar

Yao Siqu^{1,2,3} Wu Shiyu^{1,2} Zhang Jingwei^{1,2,3} Ye Shengbo^{1,2} Fang Guangyou^{1,2}

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Obstacle detection technology based on ultra-wideband life detection radar has broad application prospects in the field of non-invasive detection such as disaster relief and anti-terrorism operations. At present, most of the researches at home and abroad are using single point of view radar to detect the target, and it is difficult to detect the position of the body in the condition of low SNR. In view of the limitation of the above methods, this paper uses the multiple observation points to put the radar, and the echo signal is detected by correlation, and the spatial position of the body is obtained. The simulation results show the superiority of the proposed method in low SNR conditions. The experimental results show that the proposed method is feasible and can detect the location of life.

Keywords: ultra-wideband radar (UWB radar); multiple observation points; low signal to noise ratio (SNR); correlation detection

0 引 言

地震等自然灾害会造成大量房屋倒塌,如何在废墟中确定生命体的位置是灾害救援的一个重大难题。超宽带生命信号电磁探测是一种先进的生命检测技术,利用电磁波的反射原理^[1-2],通过检测人体呼吸所引起的微动,辨识生命体并提取生命体呼吸频率及位置信息^[3]。

超宽带生命探测雷达的基本原理是利用其天线连续发射超宽带脉冲,生命体由于呼吸造成微动,会引起反射面与雷达间的相对距离发生改变,对应的反射脉冲会出现在每个探测周期的不同时刻,将连续探测的多道数据做 B-Scan

图,可观察到微动引起的反射脉冲移动现象,即可作为生命体存在判定依据^[4]。荷兰代尔特技术大学的 Yarovoy 等人 与立陶宛 Geozondas 公司合作,开发了超宽带生命检测雷达系统,通过比较有生命体和无生命体时的频谱信号,实现了高信噪比条件下判定生命的存在。美国 GSSI 公司 2010 年推出第三代生命探测雷达 Life Locator III,采用脉冲体制,天线中心频率为 270MHz,利用无线传输方式进行远程遥控,从而降低操作者对生命探测设备的干扰^[5]。

许多研究机构提出了不同的生命检测算法,由于微弱呼吸信号具有信号强度弱和窄带特性,在低信噪比条件下难以准确可靠地定位幸存者^[6-7]。单观测点生命探测发射

天线和接收天线的距离很近,虽然能够得到生命体一维距离位置信息,但难以检测不同姿态的生命体,漏警率高,而且每次探测的区域有限^[8-10]。

针对以上问题,提出了一种采用多观测点进行生命探测的方法。该方法可以在低信噪比条件下得到较为准确的生命体位置和呼吸频率,为生命救援提供了帮助。文中首先介绍单观测点和多观测点方法的原理,然后通过仿真及实验将两种方法进行对比,仿真及实验结果表明,该方法具有可行性。

1 单观测点生命信号特征检测算法

1.1 超宽带时域信号模型的建立

超宽带生命探测雷达通过检测生命体微动引起的目标回波信号的时延变化估计生命参数^[11],在实际生命探测中,存在各种干扰,实际接收的原始回波数据不仅包含静态杂波和有用的生命微动信息,还包括各种高斯噪声^[12],与呼吸同频带的非静态杂波干扰以及其他干扰,对于脉冲超宽带雷达,回波信号 $S(t)$ 可表示为:

$$S(t) = \sum_{n=0}^{N-1} u(t-nT-\tau_r) * h_r(t) + \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{p=1, p \neq r}^P u(t-nT-\tau_p) * h_p(t) + \gamma(t) + \omega(t) \quad (1)$$

式中: $*$ 表示卷积, $u(t)$ 是发射信号, t 是快时刻, nT 是慢时刻,即回波接收时刻, $n=0,1,\dots,N-1$,且 T 是有效脉冲响应时间。 $h_r(t)$ 是呼吸微动的脉冲响应, $h_p(t)$ 是发射天线、接收天线、 $P-1$ 个静态物体的脉冲响应。 τ_r 和 τ_p 分别是人体和第 P 个物体的传播时延。 $\gamma(t)$ 是在同一范围内的非静态干扰, $\omega(t)$ 是高斯白噪声。

为了避免频率和距离混叠, T 应满足 Nyquist 采样定律,并保证所有的回波信号都在一个脉冲周期内被接收^[13]。所有反射回波中的离散信号可以表示成一个包含距离向和慢时回波道数的二维 $M \times N$ 矩阵 $S(m,n)$:

$$S(m,n) = h(m,n) + c(m,n) + \gamma(m,n) + \omega(m,n) \quad (2)$$

式中: $m=0,1,\dots,M-1$, 是快时采样点, $n=0,1,\dots,N-1$, 是慢时采样点。公式(2)中每个分量都与公式(1)中分量相对应^[14]。

根据呼吸信号周期性的特点,仿真人体谐波振动模型,理想回波矩阵 $S(m,n)$ 是电磁波到达人体胸腔后的回波,通过采用 MATLAB 和 FDTD 仿真,该回波仅包含胸腔因呼吸造成的微动,没有其他的杂波。胸腔模型是一个半径周期性变化的小球,来模拟人体的呼吸微动。慢时呼吸信号可近似于窄带信号,近似实时的信号总和 $x(\tau)$ 为:

$$x(\tau) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos(i\omega_r \tau) \quad (3)$$

式中: $\omega_r = 2\pi f_r$, A_i 是呼吸振动的幅度,胸腔模型简谐波

动的频率为 f_r (Hz)^[15]。

1.2 单观测点生命特征检测算法的实施

单观测点生命特征检测算法的具体实现步骤如下:

首先,将回波信号进行预处理,预处理方法包含 3 个步骤,分别是静态杂波去除、线性趋势抑制和预正交化^[16]。

1) 静态杂波去除

为了从回波中提取呼吸信号,需要用自适应背景去除法(ABS)去除时不变的背景信息,该方法用到了指数平均,并用一个权重系数向量 λ 代替了权重标量 α 。

$$p_n(m) = \lambda_n(m) \times p_{n-1}(m) + (1 - \lambda_n(m)) \times q_n(m) \quad (4)$$

式中: $p_n(m)$ 和 $q_n(m)$ 是大小为 $M \times 1$ 的一维向量,分别代表原始回波矩阵 $S(m,n)$ 中的采样背景估计和测量脉冲响应,因此新的背景估计包含背景估计和雷达回波。

2) 线性趋势抑制

设 $M \times N$ 雷达原始回波信号矩阵 R , 静态杂波和回波的线性趋势项由矩阵 B 表示,加性高斯噪声矩阵由 W 表示,有用微动目标和其他干扰由矩阵 R_m 表示,则雷达原始回波可表示为^[17]:

$$R^T = B^T + R_m^T + W^T = AX + R_m^T + W^T \quad (5)$$

其中 $[\cdot]^T$ 表示矩阵的转置, A 和 X 如下式所示:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ N-1 & 1 \end{bmatrix} = [a_1 \quad a_2] \quad (6)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

矩阵 A 的第 1 列表示线性趋势,第 2 列表示慢时不变量, X 为 $2 \times M$ 的矩阵, x_1 和 x_2 为 M 维行向量,分别表示静态杂波和线性趋势的权值系数,则 AX 表征了回波中的静态杂波和线性趋势项。将 X 作为待估计信号,将 $R_m^T + W^T$ 看作噪声项,则利用最小二乘法求解 X ,得:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T R^T \quad (8)$$

因此 $B^T = AX = A(A^T A)^{-1} A^T R^T$, 即为包含静态杂波和线性趋势项的背景估计,将其从原始雷达回波中减取得:

$$\tilde{R}_{\text{ls}}^T = R^T - B^T = R^T - A(A^T A)^{-1} A^T R^T \quad (9)$$

式(9)的转置即为去除了静态杂波和潜在的线性趋势项的信号 \tilde{R}_{ls} 。

3) 预正交化

在特殊条件下,离雷达系统较远的人体目标反射的回波较弱,在实际场景中,多径效应会使这样的回波中含有的呼吸信号更加微弱,甚至消失。因此,预正交化方法(AN)被用来对微弱呼吸信号进行增强。

在慢时卷积维度上的自相关和 FFT

对于在 $\tilde{S}(m,n)$ 中含有零均值噪声的第 m 个慢时信号

$x_m(n)$, 自相关函数 $R_{x_m}(n')$ 包含 DC、周期信号的幅度和频率等确定性信号, 因此可减小噪声。非周期噪声可通过自相关的方式减小至 0。

$$R_{x_m}(n') = E[x_m(n_1)x_m(n_2)] \quad (10)$$

其中 $0 \leq n_1, n_2 \leq N-1, n' = n_1 - n_2$ 。自相关保留了慢时信号 $x_m(n)$ 的周期分量和谐波分量 $R_{x_m}(n')$ 。

2 多观测点生命信号特征检测方法

选择 k 个观测点 $O_k, k = 1, 2, \dots, K$, 放置生命探测雷达, 得到回波信号并将其进行预处理, 分别截取这些回波信号矩阵中感兴趣的连续 M 行, 即认为可能存在目标信息的行, 得到含有目标信息的信号矩阵 $S_k(m, n)$, 其中, M 为每次观测结果的总采样点数, N 为总回波道数。每次取出两个不同的信号矩阵 $S_\alpha = (S_{\alpha 1}, S_{\alpha 2}, \dots, S_{\alpha M})^T, S_\beta = (S_{\beta 1}, S_{\beta 2}, \dots, S_{\beta M})^T, \alpha, \beta \in k$ 且 $\alpha \neq \beta$, 进行互相关, 也就是将 S_α 的每一行和 S_β 的每一行分别进行互相关运算, 得到一个 $M \times M \times (2N-1)$ 的三维矩阵。其中取 S_α 的第 a 行与 S_β 的第 b 行进行相关时, 针对偏移量为 c 的情况, 这两行的互相关表达式为:

$$r_{S_\alpha S_\beta}(c) = \frac{1}{2N-1} \sum_{d=0}^{N-|a|-1} S_{\alpha a}(d) S_{\beta b}(c+d) \quad (11)$$

式中: $a = 1, 2, \dots, M; b = 1, 2, \dots, M; c = -(N-1), -(N-2), \dots, 0, \dots, (N-1)$, 即该维度为 $M \times M \times (2N-1)$ 的三维矩阵中的每个点的值可用 $r_{S_\alpha S_\beta}(c)$ 表示, 该点坐标值为 (a, b, c) [18]。该矩阵示意图如图 1 所示, 图中曲线部分幅值较大, 表示两道信号间相关性较强, 可能含有呼吸信号。

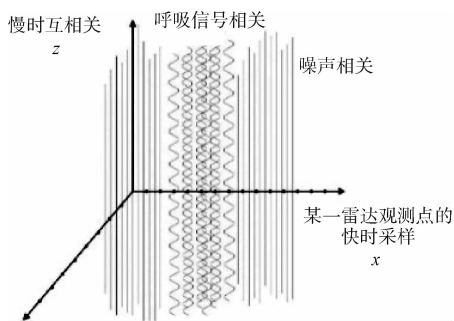


图 1 两个回波信号矩阵互相关结果

实际上信号矩阵 $S_k(m, n)$ 的 M 包含距离信息, 由于生命体与某一个雷达之间的距离是一个固定值, 因此在信号矩阵 S_α 和 S_β 中, 都仅有一行包含生命体呼吸信息。假设 S_α 中的第 ζ 行和 S_β 中的第 ξ 行包含生命体呼吸信息, 则在 S_α 和 S_β 做相关时, 只有 $S_{\alpha \zeta}$ 和 $S_{\beta \xi}$ 进行互相关所得长度为 $2N-1$ 的序列值的绝对值很大, 而两个矩阵中任取其他 2 行的相关结果值较小, 也就是 $S_{\alpha \zeta}$ 或 $S_{\beta \xi}$ 与其他行相关的结果也是 0。将矩阵 R 在 z 方向上做快速傅里叶变换(FFT)后的最终结果为:

$$R_{S_\alpha S_\beta}(\gamma) = \text{FFT}[r_{S_\alpha S_\beta}(c)] \quad (12)$$

式中: $-(N-1) < \gamma < N-1, R_{S_\alpha S_\beta}(\gamma)$ 包含目标呼吸频率和目标与这两个信号矩阵所对应雷达的距离, $R_{S_\alpha S_\beta}(\gamma) \gg 0$ 的点对应着呼吸频率 [19], 其余的 $R_{S_\alpha S_\beta}(\gamma) \approx 0$ 。进行 FFT 后的最终结果示意图如图 2 所示

由于有 k 个观测点, 因此共进行 C_k^2 次互相关, 得到 C_k^2 个目标呼吸频率 $f_{\mu\epsilon}, \mu = 1, 2, \dots, K-1, \epsilon = 2, 3, \dots, K, \mu < \epsilon$, 以及该呼吸频率所对应的两个距离值 $R_{f_{\mu\epsilon}}, R_{\omega}$ 。因此对于任意一个观测点 O_k , 共可以得到 $K-1$ 个距离值 $R_{k\omega}, \omega \in \{1, 2, \dots, K\}, \omega \neq k$, 因此观测点 O_k 与生命体的平均距离为:

$$R_k = \frac{\sum_{k \neq \omega} R_{k\omega}}{K-1} \quad (13)$$

将其定义为互相关方法的距离检测值。

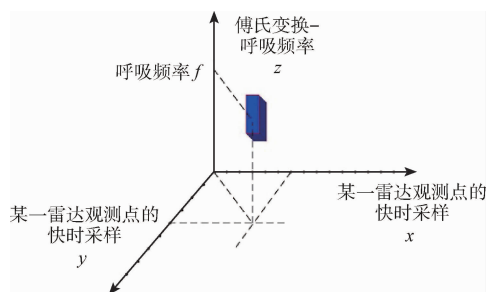


图 2 该方法进行 FFT 后最终结果

综上所述, 该算法流程如图 3 所示。



图 3 多观测点生命特征检测方法流程

3 仿真及实验结果

3.1 仿真结果分析

本节将通过仿真数据验证本文提出的多观测点生命信号特征检测方法的有效性。建立仿真场景如图 4 所示。成像区域的整体尺寸为方位向 $0 \sim 2.5$ m, 距离向 $0 \sim 2.5$ m, 高度向 $0 \sim 2.5$ m, 位于其中的目标为一个 0.2 m \times 0.2 m 的金属板, 其振动幅度 0.1 m, 振动频率为 0.5 Hz 由 4 个一发一收生命探测雷达组成的阵列放置于距离目标 1.5 m 处, 发射信号是 500 MHz 脉冲周期信号, 假设生命体位置为 $(0, 0, 0)$, 则这 4 个生命探测雷达的位置分别为 $(0.5, 0, 1), (-0.5, 0, 1), (0, 0.5, 1), (0, -0.5, 1)$ 。因此生命体位置与生命探测雷达的欧几里得距离为 1.118 m。

在无噪声情况下, 按照第 2 节多观测点生命信号特征检测方法处理后的结果如图 5 所示, 可以得到生命体与这 4 个观测点的距离分别为:

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{13} + R_{14}}{3} = \frac{1.119 + 1.119 + 1.119}{3} =$$

1.119 m

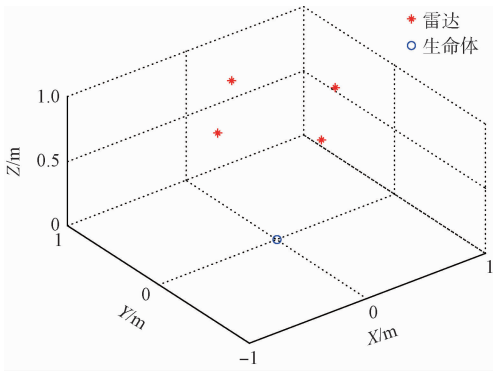


图4 仿真场景

$$R_2 = \frac{R_{21} + R_{23} + R_{24}}{3} = \frac{1.125 + 1.119 + 1.119}{3} =$$

1.121 m

$$R_3 = \frac{R_{31} + R_{32} + R_{34}}{3} = \frac{1.125 + 1.128 + 1.119}{3} =$$

1.124 m

$$R_4 = \frac{R_{41} + R_{42} + R_{43}}{3} = \frac{1.119 + 1.119 + 1.125}{3} =$$

1.121 m

在 $SNR = -15$ dB 情况下,按照第3节多观测点生命信号特征检测方法处理后的结果如图6所示,可以得到生命体与这4个观测点的距离分别为:

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{13} + R_{14}}{3} = \frac{1.119 + 1.119 + 1.119}{3} =$$

1.119 m

$$R_2 = \frac{R_{21} + R_{23} + R_{24}}{3} = \frac{1.143 + 1.119 + 1.119}{3} =$$

1.127 m

$$R_3 = \frac{R_{31} + R_{32} + R_{34}}{3} = \frac{1.131 + 1.155 + 1.125}{3} =$$

1.137 m

$$R_4 = \frac{R_{41} + R_{42} + R_{43}}{3} = \frac{1.119 + 1.125 + 1.137}{3} =$$

1.127 m

从图5(e)~(j)和图6(e)~(j)根据多观测点生命信号特征检测方法处理数据所得结果可以看出,该方法可测出生命体与雷达的距离,且无噪情况下,雷达所检测出来的距离更接近真实值。仿真结果证明了该方法可以准确检测出生命体和雷达之间的距离以及呼吸频率,进而证明了该方法的有效性。

3.2 实验结果分析

实验场景如图7所示,分别进行了两个实验来验证所提出的多观测点生命信号特征检测方法的有效性,并之前在文献[20]中所提出的算法进行了对比,第一个实验是人躺在如图7所示楼梯的拐角处,500 MHz 脉冲生命探测雷达位于人体上方一层楼板处,每层高度为3.75 m,每层

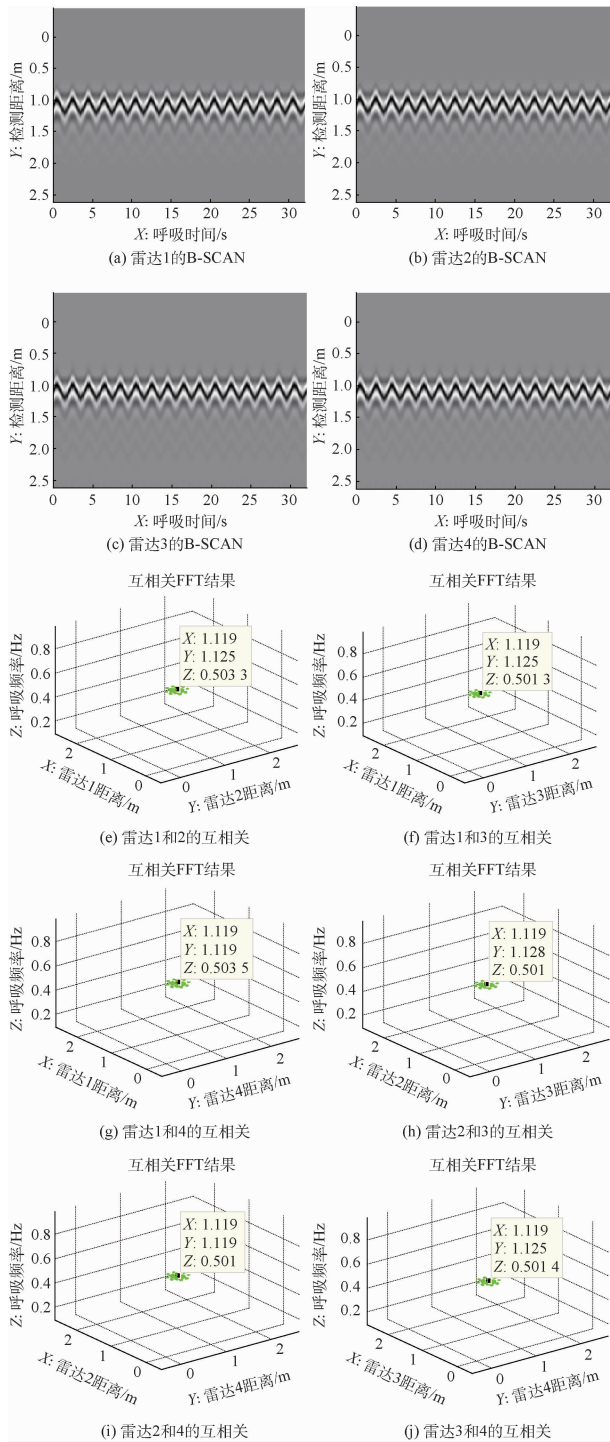


图5 无噪情况下呼吸信号检测效果

楼板厚度30 cm,材质为混凝土,每层台阶高度15.5 cm。以人体位置为原点建立空间直角坐标系,选择坐标分别为 $(-1.07, 0, 3.75)$, $(-1.07, 0.75, 3.595)$, $(1.07, 0, 3.75)$, $(1.07, 1.3, 3.905)$ 的4个观测点对人体进行探测,因此这4个点与人体的距离分别为3.899 7 m, 3.825 1 m, 3.899 7 m, 4.117 8 m,回波信号如图8所示,通过两种算

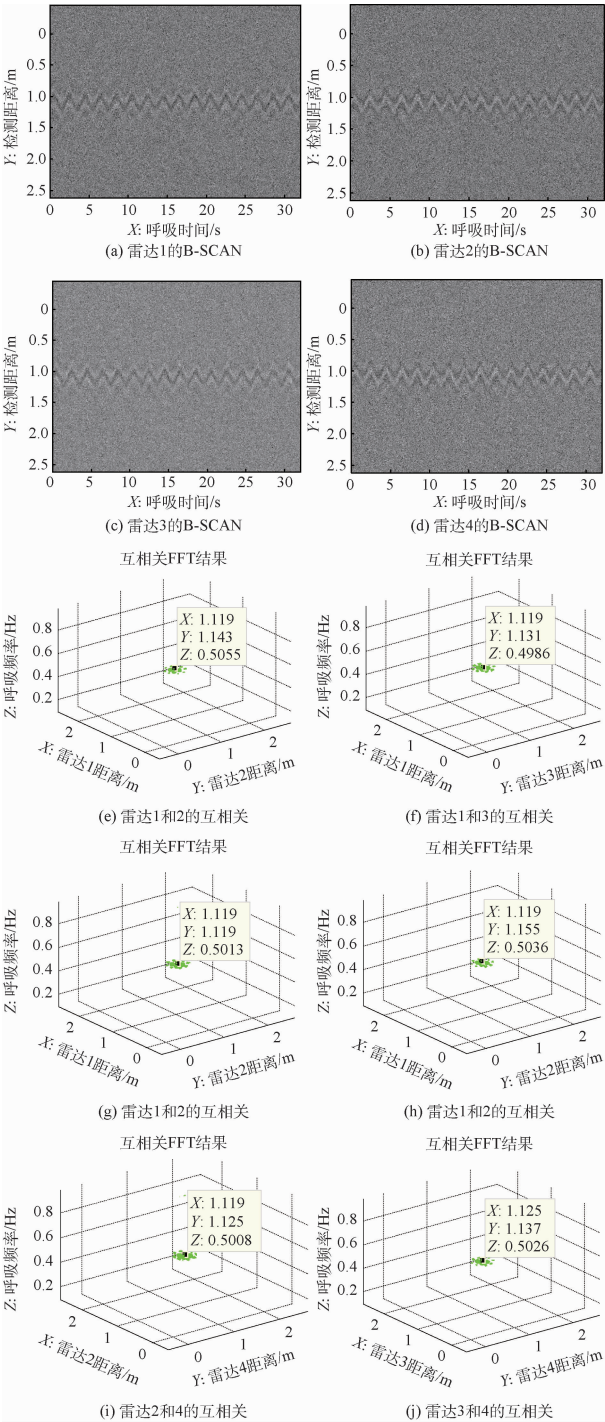


图 6 SNR=-15 时呼吸信号检测效果

法所处理出来的实验结果如图 9,图 10 所示。

通过自相关方法获得的 4 个观测点与生命体之间的距离分别为：

- $L_1 = 4.182\text{ m}$
- $L_2 = 3.828\text{ m}$
- $L_3 = 3.852\text{ m}$
- $L_4 = 4.08\text{ m}$



图 7 实验场景

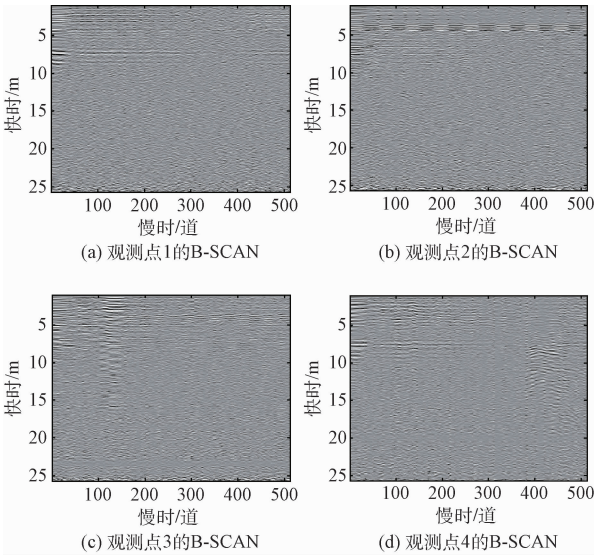


图 8 4 个观测点的回波信号 B-SCAN

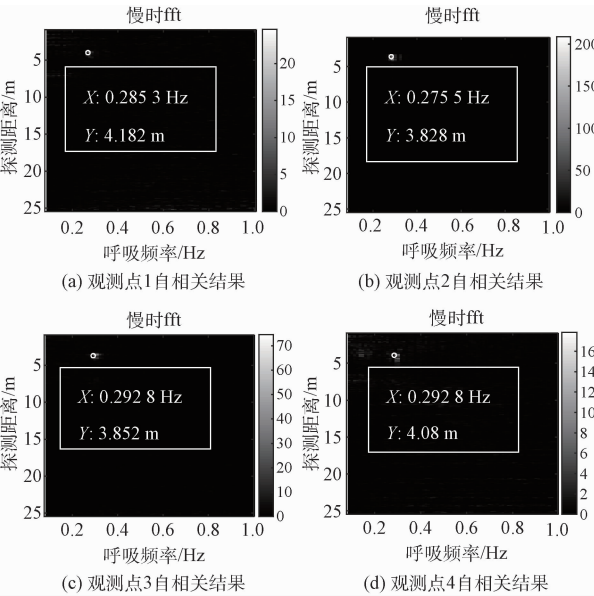
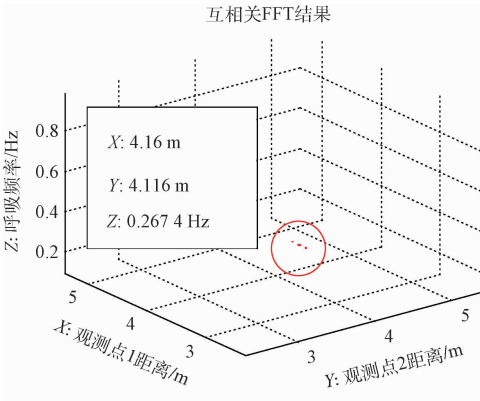
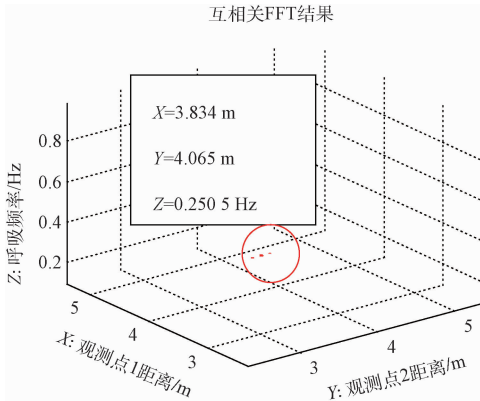


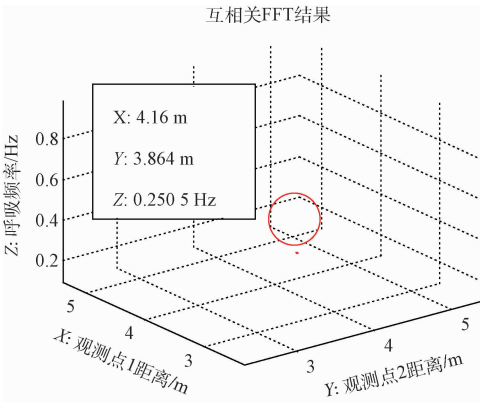
图 9 自相关算法处理结果



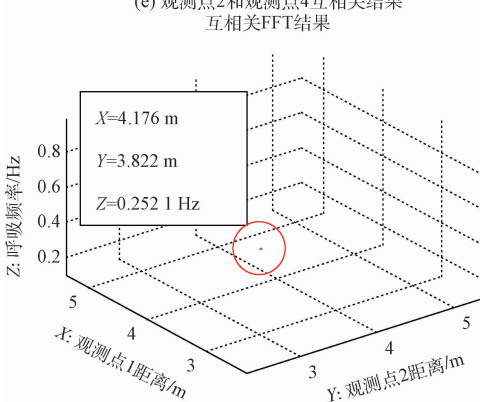
(a) 观测点1和观测点2互相关



(e) 观测点2和观测点4互相关结果
互相关FFT结果

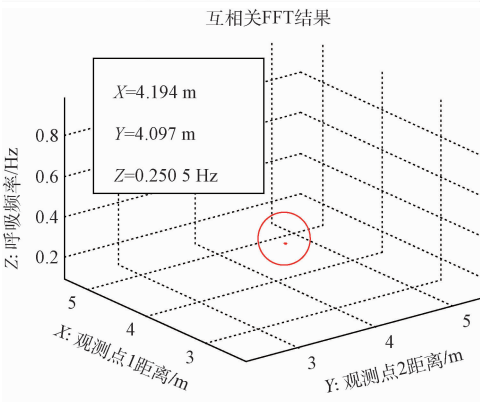


(b) 观测点1和观测点3互相关结果
互相关FFT结果

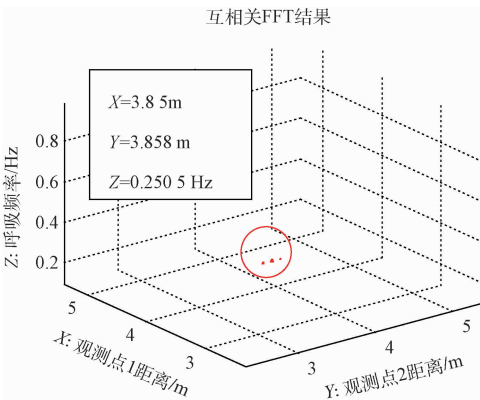


(f) 观测点3和观测点4互相关结果

图 10 互相关算法处理结果



(c) 观测点1和观测点4互相关结果
互相关FFT结果



(d) 观测点2和观测点3互相关结果

通过互相关方法获得的 4 个观测点与生命体之间的距离分别为:

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{13} + R_{14}}{3} = \frac{3.906 + 4.16 + 4.194}{3} = 4.086 \text{ m}$$

$$R_2 = \frac{R_{21} + R_{23} + R_{24}}{3} = \frac{4.116 + 3.85 + 3.834}{3} = 3.933 \text{ m}$$

$$R_3 = \frac{R_{31} + R_{32} + R_{34}}{3} = \frac{3.864 + 3.858 + 4.176}{3} = 3.966 \text{ m}$$

$$R_4 = \frac{R_{41} + R_{43} + R_{43}}{3} = \frac{4.097 + 4.065 + 3.822}{3} = 3.995 \text{ m}$$

由于这 4 个观测点与生命体的理论距离为:

$$D_1 = 3.899 \text{ 7 m}$$

$$D_2 = 3.825 \text{ 1 m}$$

$$D_3 = 3.899 \text{ 7 m}$$

$$D_4 = 4.117 \text{ 8 m}$$

由此可以得表 1。

表 1 实验 1 两种方法处理结果对比 (m)

D	L	R	$ L-D $	$ R-D $
3.899 7	4.182	4.086	0.282 3	0.186 3
3.825 1	3.828	3.933	0.002 9	0.107 9
3.899 7	3.852	3.966	0.047 7	0.066 3
4.117 8	4.08	3.995	0.037 8	0.122 8

自相关方法和互相关方法所得结果的对比表明了互相关方法在生命体呼吸信号检测和定位方面更具有优势。

第二个实验是 500 MHz 脉冲生命探测雷达位于人体上方两层楼板处,每层高度为 3.75 m,每层楼板厚度 30 cm,材质为混凝土,每层台阶高度 15.5 cm。以人体位置为原点建立空间直角坐标系,选择坐标分别为 $(-1.07, 0, 7.5)$, $(1.07, 0, 7.5)$ 的 2 个观测点对人体进行探测,因此这 2 个点与人体的距离均为 7.579 5 m,回波信号如图 11 所示,通过两种算法所处理出来的实验结果如图 12、图 13 所示。

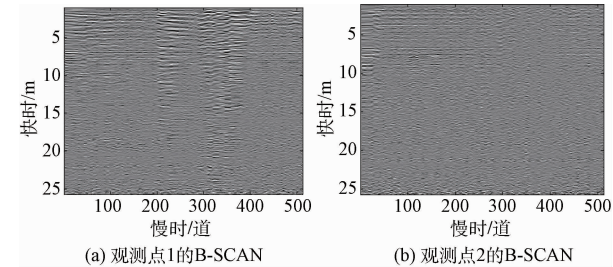


图 11 4 个观测点的回波信号 B-SCAN

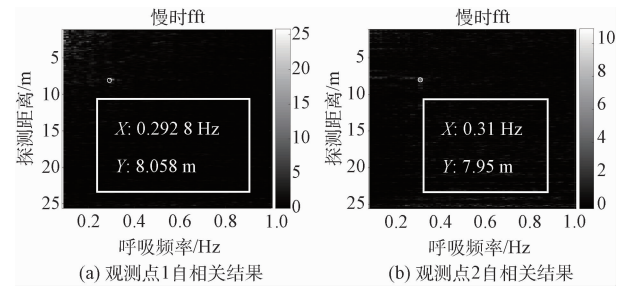


图 12 自相关算法处理结果

通过自相关方法获得的 4 个观测点与生命体之间的距离分别为:

$$L_1 = 8.058 \text{ m}$$

$$L_2 = 7.95 \text{ m}$$

通过互相关方法获得的 4 个观测点与生命体之间的距离分别为:

$$R_1 = 8.052 \text{ m}$$

$$R_2 = 7.93 \text{ m}$$

由于这 4 个观测点与生命体的理论距离为:

$$D_1 = 7.5795 \text{ m} = D_2$$

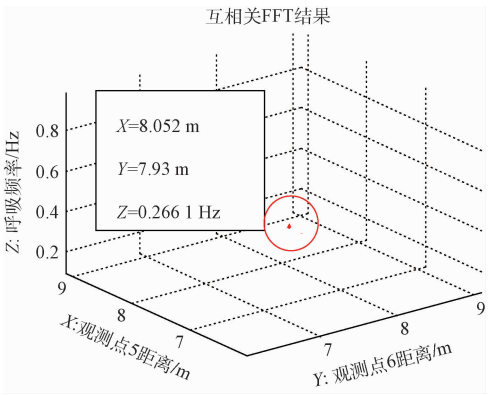


图 13 互相关算法处理结果

自相关方法和互相关方法所得结果如表 2 所示。对比表明,互相关方法得到的生命体距离和呼吸频率更接近理论值。

表 2 实验 2 两种方法处理结果对比 (m)

D	L	R	$ L-D $	$ R-D $
7.579 5	8.058	8.062	0.478 5	0.472 5
7.579 5	7.95	7.93	0.370 5	0.350 5

4 结 论

本文提出了一种基于超宽带生命探测雷达的多观测点呼吸信号检测及目标定位方法,该方法以单观测点目标检测算法预处理后的检测结果为基础,通过引入互相关和 FFT 运算,提高了低 SNCR 条件下距离检测的准确性,进一步提高了系统在不同检测环境下的识别适应能力。仿真和实验结果证明,采用本文提出的新方法,能有效获取低信噪比条件下生命体距离和位置信息,缩小了救援范围,为生命救援提供了保障。

参考文献

[1] 高云泽,叶盛波,张晓娟,等. 基于电磁感应和超宽带雷达的新型探测系统[J]. 电子测量技术, 2015(9): 128-134.

[2] 栗榛,叶盛波,高云泽,等. 基于安卓平台的小型化混凝土探测雷达系统[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11): 146-150.

[3] 曹文琛,张顺生. 基于 EMD 的无载波超宽带雷达目标检测算法[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(3): 285-289.

[4] 吴世有. 超宽带穿墙雷达运动目标成像方法研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所, 2012.

[5] 徐艳云. 基于超宽带雷达技术的生命微动信号检测方法研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所, 2012.

[6] 陈超,孟升卫,陈洁,等. 超宽带生命探测雷达研制及

- 应用[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3): 15-19.
- [7] 徐兰霞, 欧青立, 崔力. 混沌超宽带通信调制方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(1): 33-35.
- [8] 晋良念, 钱玉彬, 刘庆华, 等. 超宽带穿墙雷达偏离网格目标稀疏成像方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 743-748.
- [9] 陈晨, 李欣, 丁宏, 等. 减小超宽带穿墙定位中 NLOS 误差的方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 451-457.
- [10] JIANG SH Y, GAO T CH, LIU X CH. The simulation and error analysis of raindrop size distribution obtained by micro rain radar [J]. Instrumentation, 2015(3): 43-54.
- [11] 刘潇文, 蒋磊, 许华, 等. 基于希尔伯特-黄和小波包的 UWB 信号检测方法[J]. 计算机科学, 2016, 43(6): 102-105, 134.
- [12] 祝忠明, 王绪本, 何永波. 穿墙脉冲雷达回波信号人体微动特征识别初步研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(2): 597-599.
- [13] 马昌荣, 王艳芬, 钟虎. 基于 BOK 调制的 Chirp 超宽带通信系统的 Simulink 仿真实现[J]. 徐州工程学院学报, 2011(2): 32-37.
- [14] 宋晓鸥. 一种适用于超宽带脉冲信号检测的改进 CUSUM 算法[J]. 电讯技术, 2013, 53(9): 1169-1174.
- [15] WU SH Y, TAN K, XIA ZH H. Improved human respiration detection method via ultra-wideband radar in through wall or other similar conditions [J]. Iet Radar Sonar Navigation, 2015, 10(3): 468-476.
- [16] 杨志华, 张钦宇, 张乃通. 基于遗传算法的 UWB 信号非相干捕获方法 [J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1568-1573.
- [17] 李涛, 冯大政, 夏宇垠. 一种新的非相干积累算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(2): 267-272.
- [18] 邹士迁, 刘鑫, 陈卫华. 火控雷达测量误差自相关时间分析[J]. 国外电子测量, 2015, 34(9): 29-33.
- [19] 陈喜艳. 基于 SOA 的超宽带脉冲测距系统[J]. 通信技术, 2011(9): 10-12.
- [20] WU SH Y, YAO S Q, TAN K. Study on a Novel UWB linear array human respiration model and detection method [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(1): 125-140.

作者简介

姚思奇, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为超宽带雷达探测。

E-mail: 853601142@qq.com