

基于无载频脉冲雷达信号等幅度追踪法检测生命信号

谢义方^{①②} 方广有^①

^①(中国科学院高功率微波与电磁辐射重点实验室中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100190)

摘要: 该文首先详细分析了无载频脉冲雷达检测生命信号的基本原理, 然后提出了基于回波信号等幅度追踪法检测生命信号的方法。采用自主研发的雷达系统进行检测, 结果表明该文提出的检测方法有效。该方法不但能准确判定生命体的有无, 而且能够同时提供呼吸信号幅度、频率特征及生命体的位置信息, 在短距离非接触式生命信号检测中较传统等距离法有明显优势。

关键词: 超宽带雷达; 生命信号检测; 频谱搜索; 等幅度追踪

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)05-1132-04

Equi-amplitude Tracing Algorithm Based on Base-band Pulse Signal in Vital Signal Detecting

Xie Yi-fang^{①②} Fang Guang-you^①

^①(The Key Laboratory of High Power Microwave and Electromagnetic Radiation, The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, a novel method, i.e., the equi-amplitude tracing method applicable to the detecting of vital signal is presented based on the analyses of the principle of vital signal detecting by means of base-band UWB radar. The self-developed UWB radar test set-up experiments demonstrate that the detecting scheme and the signal processing algorithm are feasible. The respiratory signal amplitude and frequency spectrum characteristics and the distance between the object and the antenna can be obtained simultaneously with distinct advantage over traditional equi-distance detecting method.

Key words: UWB radar; Vital signal detecting; Frequency spectrum searching; Equi-amplitude tracing

1 引言

相对单频或窄带连续波雷达, 基于无载频脉冲体制的超宽带雷达穿透能力强、分辨率高、抗干扰性强、功耗小、成本低^[1]。近年来, 无载频脉冲雷达已经在探地、汽车防撞、飞行器分类识别等多方面得到了应用^[2,3]。因反恐、救灾与医疗监护等方面的需要, 基于超宽带无载频脉冲雷达技术的生命信号(呼吸、心跳)检测方法引起了国内外研究者的广泛兴趣。美国、俄罗斯、意大利等国相继进行原理样机开发^[4-8]。其中俄罗斯的超宽带组及美国的 Timedomain 公司科研成果代表了该领域的目前最高发展水平, 他们都已于近年推出了有一定应用价值的产品。国内也已开始了该项研究工作, 但性能较好的雷达样机尚未见报道^[9]。

为了从雷达回波中提取出生命信号, 基于距离门技术的定距离法已被广泛采用^[1], 使用该方法只能得到以慢时间为自变量的一维信号, 当目标距离变化时需要进行人机交互。

有时, 可由计算机自动搜索目标, 但由于生命体运动频率低, 识别其特征不能在短时间内完成^[10]。此外, 由于发射信号的上升及下降沿的非线性, 运用等距离法检测得到的结果往往会引入非线性失真。同时, 采用等距离法的检测结果与接触式传感器检测结果类似, 只能得出生命体微动的相对幅度。

本文提出了一种新的基于无载频脉冲超宽带雷达信号等幅度追踪检测生命信号的方法。首先从数学上分析论证了超宽带脉冲雷达进行生命信号检测的等幅度追踪法原理, 导出基于频谱搜索的等幅度追踪法检测生命信号的算法, 然后运用自主研发的雷达实验系统进行生命体实时检测实验。实验结果表明: 该方案搜索速度快, 能较好地实现生命信号检测; 当检测距离较近、信噪比较大时, 检测结果较传统等距离法更加精确。同时, 本文提出的检测方法通过搜索找到最佳检测追踪起始快时间点, 估算出生命体距天线的距离及生命体微动的幅度。

2 生命信号检测等幅度追踪法原理分析

假设 R_0 表示从雷达收发天线到人体胸腔皮肤的平均距离, 则雷达收发天线到人体胸腔皮肤瞬时距离可以表示为

$$R(t) = R_0 + r(t) \quad (1)$$

其中 $r(t)$ 表示由于呼吸、心跳等人体微动引起的该距离的动态部分。假定人体微动近似为简谐振动

$$r(t) = A \sin(\omega_0 t) \quad (2)$$

其中 A 表示人体微动的幅度， ω_0 表示人体微动的角频率。

同时假设除人体外，周围其它物体都是静止的，则雷达发射天线-散射目标-接收天线这一信道的冲激响应可表示为

$$h(t, \tau) = \sum_i a_i \delta(\tau - \tau_i) + a_v \delta(\tau - \tau_v(t)) \quad (3)$$

其中 $\sum_i a_i \delta(\tau - \tau_i)$ 与周围静止目标相对应， $a_v \delta(\tau - \tau_v(t))$ 与人体胸腔相应， $\tau_v(t)$ 表示为

$$\tau_v(t) = \frac{2(R_0 + r(t))}{c} = \tau_0 + \tau_d \sin(\omega_0 t) \quad (4)$$

其中 τ_0 与天线距人体胸腔的平均距离相关； τ_d 与人体胸腔微动幅度相关； τ 和 t 分别表示快慢时间。对于脉冲体制的超宽带雷达，假设发射天线发射信号为 $p(\tau)$ ，则接收天线接收信号为

$$S(t, \tau) = p(\tau) * h(t, \tau) = \sum_i a_i p(\tau - \tau_i) + a_v p(\tau - \tau_v(t)) \quad (5)$$

对 τ 和 t 进行离散化后得到：

$$S(m, n) = \sum_i a_i p(n\delta_T - \tau_i) + a_v p(n\delta_T - \tau_v(mT_s)) \quad (6)$$

δ_T 和 T_s 分别表示快慢时间的采样间隔， $m = 0, 1, 2, \dots, M-1$ ， $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 则 $S(m, n)$ 为一 $M \times N$ 矩阵。为了分析问题方便，我们假定时间是连续的，结论对离散时间同样适用。假设雷达发射天线发射信号为高斯脉冲：

$$p(t) = e^{-\frac{4\pi(t-t_c)^2}{\beta^2}} \quad (7)$$

则

$$s(t, \tau) = a_v e^{-\frac{4\pi(\tau - \tau_c - \tau_0 - \tau_d \sin(\omega_0 t))^2}{\beta^2}} + \sum_i a_i p(\tau - \tau_i) \quad (8)$$

当 $\tau > \frac{\beta}{2} \sqrt{\frac{5}{\pi}} + \tau_0 + \tau_c + \tau_d$ 或 $\tau < -\frac{\beta}{2} \sqrt{\frac{5}{\pi}} + \tau_0 + \tau_c - \tau_d$ 时

$$\frac{4\pi(\tau - \tau_0 - \tau_c - \tau_d \sin(\omega_0 t))^2}{\beta^2} \geq 5, \quad a_v e^{-\frac{4\pi(\tau - \tau_c - \tau_0 - \tau_d \sin(\omega_0 t))^2}{\beta^2}}$$

$\leq 0.0067a_v$ ，逼近 0。在 τ 该范围所对应的 $s(t, \tau)$ 中很难检测出人体微动信息，因此只有在 τ 的合适范围内才能检测到人体微动信息。由于人体胸腔波动幅度很小，因此在雷达信号中包含人体胸腔波动信息的 $\Delta\tau$ 很短。可以近似认为在此范围内的 $\sum_i a_i p(\tau - \tau_i)$ 不变。若令

$$s(t, \tau) = \text{Const} \quad (9)$$

则

$$\frac{4\pi(\tau - \tau_c - \tau_d \sin(\omega_0 t))^2}{\beta^2} = \text{Const} \quad (10)$$

则

$$\tau(t) = \tau_c - \tau_d \sin(\omega_0 t) \quad (11)$$

由式(11)可以看出：通过追踪雷达信号等幅值点，其等幅值

点所对应的 $\tau(t)$ 包含了人体胸腔微动信息，且 $\tau(t)$ 同时包含了人体胸腔微动的幅度与频率信息。另外，由于雷达信号中包含人体胸腔微动信息的 τ 的局部特性，因此首先需根据人体胸腔微动的频谱特征进行搜索，找到包含人体胸腔微动信息的最优 τ 。

3 生命信号检测方法实验验证

3.1 信号提取算法

为了验证以上所述数学分析，我们自主研发了一套无载频脉冲超宽带雷达系统。发射机发射脉冲宽度为 500ps，脉冲重复频率为 5MHz。采用差频式等效采样接收方案，快时间间隔为 4ps，每 10ms 得到一道雷达数据。

生命信号提取算法流程图如图 1 所示。主要步骤为：(1) 对接收到以快、慢时间为自变量的二维雷达数据运用 3×3 的窗口进行二维均值滤波；(2) 依据欲搜寻的空间范围确定搜索快时间的起点、终点；(3) 以起始道当前快时间雷达数据幅值为等幅值的参考值；(4) 依据人体胸腔微动幅度设定追踪等幅值的快时间范围；(5) 以当前快时间为中心，在步骤(4)中预设的快时间范围内追踪等幅度值，计算出对应追踪结果的快时间相对当前快时间的差，并记录下差的绝对值的最小值所对应的快时间差；(6) 对由步骤(5)所得结果进行均值滤波和加窗去均值；(7) 根据生命信号的频谱特性，选择进行幅频特性最大值滤波的范围；(8) 最大值滤波，第一步在预设频谱范围内找出最大值，第二步，把在循环中得到的对应不同起始快时间的第一步结果再进行最大值滤波，得到最优追踪起始快时间；(9) 锁定该快时间，依次运行步骤(1)、步骤(3)-步骤(6)，对得到的生命信号进行 FFT 得到信号的频谱，由得到最优追踪起始快时间计算出人体距雷达天线的距离，同时输出生命信号、生命信号的频谱及人体距天线的雷达天线的距离。

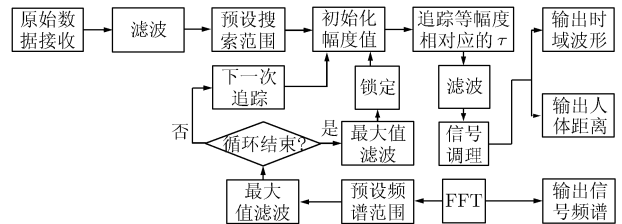


图 1 基于频谱搜索的等幅度追踪法流程图

3.2 算法性能分析

在原理分析中，噪声被忽略。然而，实际系统中噪声是不可避免的。为了研究噪声对检测结果的影响，我们对噪声对检测的呼吸信号的信噪比和频率误差的影响进行了分析。为了研究问题的方便，我们运用双站雷达的雷达方程

$$P_b = \frac{P_T G_T G_R \alpha}{(4\pi r/\lambda)^2} \quad (12)$$

其中 P_T 、 G_T 、 G_R 、 α 、 λ 和 n_{pl} 分别表示雷达发射功率、

发射及接收天线增益、反射系数、波长和路径损耗指数。在仿真实验中,取 $P_T=125\text{mW}$, $G_T=G_R=2$, $\alpha=0.72$, $\lambda=0.3\text{cm}$, 发射脉冲底宽约为 500ps ($\beta=2\sqrt{\pi}\times 10^{-10}$); 噪声为均值为零, 标准差 $0.02\mu\text{W}$ 的加性高斯噪声。设人体胸腔微动幅度为 0.75cm , 频率为 0.2Hz 的简谐振动。假定接收机能完全不失真重构原始回波信号, 则检测到的呼吸信号基波的频率的平均相对误差与距离的关系如图 2(a) 所示, 当目标距离为 0.2m 时, 本文方法以及等距离法检测的结果的幅频特性与假定的标准 0.2Hz 的正弦信号加矩形窗后的幅频特性对照如图 2(b) 所示。由结果可以看出, 随着距离的增大信噪比的降低, 本文提出的等幅度追踪法与传统的等距离法都使得检测结果的频率误差增大。而且, 当距离较大时由于运用等幅度追踪法的检测结果受追踪范围内的所有快时间点的噪声影响, 得到的频率相对误差大于运用等距离法所得结果。但当距离较小、信噪比较大时, 由于采用等距离追踪法得到的信号与原始呼吸信号同频同相, 而根据贝塞尔函数理论^[11]

$$e^{-j\gamma \sin(2\pi f_0 t)} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_l(\gamma) e^{-j2\pi l f_0 t} \quad (13)$$

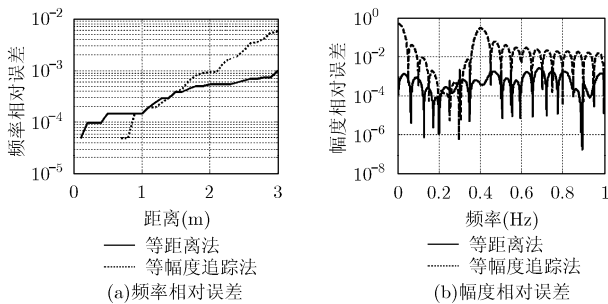


图2 等幅度追踪法性能分析

采用等距离法得到的信号为频率等于生命体微动频率的基波与各次谐波的叠加。因此当检测距离较小时运用等幅度追踪法检测得到的呼吸信号的频谱特征相对于运用传统的等距离法得到的结果, 精确度更高、误差更小。采用本文提出的等幅度追踪法检测生命信号在近距离时能更加精确的反应人体生命信号的模式, 这在医学监护及测谎中具有重要意义。另外, 等距离追踪法基于快慢时间二维空间, 因此在对信号可以充分利用二维信息, 采用二维信号处理算法进行处理, 提高信号信噪比。而等距离法只着眼于慢时间一维信号, 虽然所需存储大大减少, 但同时牺牲了信噪比。

4 实验结果

对于无人和有人两种场景分别进行雷达检测实验, 同时采用南京美易公司生产的生命信号采集处理系统进行测量。检测结果如图 3 所示。其中图 3(a) 为使用接触式呼吸传感器实施人体检测的检测结果; 图 3(b) 为在有人场景下对接收到的雷达信号运用传统等距离法所得的输出信号的时域波形;

图 3(c)、3(d) 分别为在无人和有人场景下运用本文所提出的等幅度追踪法追踪得到的快时间关于慢时间的函数波形。从结果可以看出, 本文所提出的生命信号检测方法不但能通过搜索准确判定生命体的有无, 同时可以有效地检测出生命体的呼吸信号的特征, 检测结果与接触式压力传感器检测结果一致(14 次/分)。同时从结果可以看出, 运用等幅度追踪法追踪得到的快时间范围为 $100\text{--}150\text{ps}$, 导出人体胸腔微动的幅度为 $1.5\text{--}2\text{cm}$ 。另外, 由本文所提出的基于频谱搜索算法搜索到的快时间约为 3.6ns , 计算可得人体距天线距离大约为 0.54m , 与实际 0.5m 左右较为吻合。

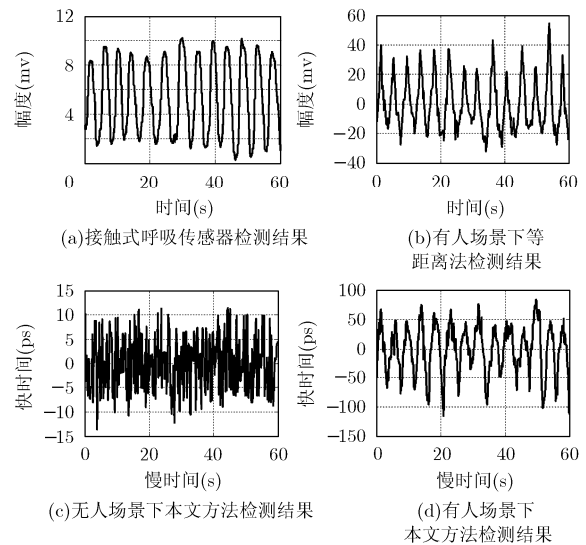


图3 实验结果

5 结束语

脉冲体制的超宽带雷达平均功率低、分辨率高、具有距离选通功能、抗背景噪声和多径干扰能力较强, 在生命探测中具有明显优越性。本文提出的基于频谱搜索的等幅度追踪法, 充分利用快、慢时间和信号幅度三维信息, 采用人机交互与自动搜索, 不但可以对生命体的存在与否给出判决, 而且当生命体存在的位置与距离未知时可以检测出生命信号, 同时估算出生命体距天线距离, 这在救援中很有意义。该方法由于避免了传统的等距离法的非线性失真问题, 在近距离非接触式生命信号检测与模式识别中具有明显优势。由于检测结果不是电压幅值而是对应等幅度的快时间的波动, 该方法可以估算出用传统方法无法得到的生命体微动的幅度。该方法实现计算量小、速度快, 易于用硬件实现实时处理。进一步的研究将开发性能更高的硬件系统, 更加智能化、多功能、鲁棒性好的软件系统。达到远距、精确、快速地在复杂环境下同时检测出包括微动的人体活动信息及人体距离及方位信息。

参考文献

- [1] Igor Y Immoreev. Practical application of ultra-wideband

- radars[C]. Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals, Sevastopol, Ukraine, 18-22 September, 2006: 44-49.
- [2] Han J and Nguyen C. Development of a tunable multiband UWB radar sensor and its applications to subsurface Sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, 7(1): 51-58.
- [3] Sato M, Takahashi K, and Fujiwara J. Development of the hand held dual sensor ALIS and its evaluation[C]. IEEE International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, Aula Magna Partenope, June, 27-29, 2007: 3-7.
- [4] Nishiyama Keisuke, Mase Atsushi, and Kogi Yuichiro. Detection of vital signal using microwave active sensor[J]. Papers of Technical Meeting on Plasma Science and Technology, IEE Japan, 2005, Vol. PST-05: 41-44.
- [5] Immoreev I Ya and Samkov S V. Ultrawideband radar for remote detection and measurement of parameters of the moving objects on small range[C]. IEEE Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals Second International Workshop, Sevastopol, Ukraine, Sept. 19-22, 2004: 214-216.
- [6] Lubecke V M and Boric-Lubecke O. Through-the-Wall Radar Life Detection and Monitoring[C]. IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, Honolulu, HI, June, 2007: 769-772.
- [7] Hernenko A and Ziganshin E. Pulse-doppler UWB radar[C]. Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals. Sevastopol, Ukraine, September, 18-22, 2006: 145-147.
- [8] Domenico Zito and Domenico Pepe. Feasibility study of a low-cost system-on-a-chip UWB pulse radar on silicon for the heart monitoring [C]. International Waveform Diversity and Design Conference, 4-8 June, 2007: 32-36.
- [9] 粟毅, 黄春琳, 雷文太. 探地雷达理论与应用[M]. 第一版, 北京: 科学出版社, 2006: 266-268.
- [10] Xiao Yan-ming and Lin Jen-shan. Frequency-tuning technique for remote detection of heart and respiration using low-power double-sideband transmission in the Ka-band[J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(5): 2023-2031.
- [11] 梁昆森. 数学物理方法[M]. 第三版, 北京: 高等教育出版社, 1998: 341-342.
- 谢义方: 男, 1974 年生, 博士生, 研究方向为超宽带雷达与微波生命探测技术。
- 方广有: 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 中科院“百人计划”入选者, 研究兴趣主要为超宽带电磁学及其工程应用、损耗介质中隐蔽目标的电磁探测、微波成像新技术和新方法和电磁场的数值计算方法等。