

· 通信与信息工程 ·

步进频连续波体制生命迹象探测方法研究

孔令讲, 苏婷婷, 崔国龙, 杨建宇, 杨晓波

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】基于步进频连续波, 利用MTD滤波, 通过时域、频域联合检测, 研究了生命迹象探测的新方法, 在检测到人体的同时, 实现测距的目的。首先, 基于人体微动模型建立步进频连续波生命迹象探测的回波模型; 然后由回波得到距离像信息, 划分距离门, 经时域检测后, 对有信号的距离门内距离峰值变化信息进行傅里叶变换; 再通过MTD滤波, 滤除静止目标的影响, 经频域检测, 即可检测到人体。仿真证明了该方法的有效性。

关键词 联合检测; 生命迹象探测; MTD滤波; 步进频连续波

中图分类号 TN957.51

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.06.002

Life Detection Method Research for Stepped-Frequency CW Radar

KONG Ling-jiang, SU Ting-ting, CUI Guo-long, YANG Jian-yu, and YANG Xiao-bo

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Based on stepped-frequency continuous wave (SFCW) and MTD filter with joint detection in time and frequency domain, a new method for life detection is proposed to get the range information in detecting human beings. Firstly, stepped-frequency continuous echo model in life detection built is according to human vibration model. Secondly, range gate is divided and time domain detection is used to gain the actually range gate where the targets are. And thirdly, the frequency information of these range gates is obtained, and then the effect of statistic objects eliminated through MID filter. At last, frequency domain detection is applied to get human beings targets. The theoretical validity is illustrated by simulation results.

Key words joint detection; life detection; MTD filter; stepped-frequency continuous wave

生命迹象探测在搜救、反恐、远程医疗等方面有着广泛的应用。其探测机理是利用生命体目标摄动(心跳、呼吸等)对探测信号回波的相位调制, 对回波进行微多普勒分析, 从而实现对目标的探测和相关参数估计等。近年来, 生命迹象探测引起了各国研究人员的关注, 发展迅速^[1-5]。

文献[6]采用不同频率的雷达连续波天线同时进行检测, 在模拟地震后建筑物坍塌的废墟中, 通过频域检测, 得到了呼吸和心跳信号。文献[7-8]用连续波进行生命迹象探测, 对生命迹象探测进行了仿真, 可估计心跳、呼吸频率估计。他们都是利用连续波实现探测的, 故不能得到目标距离信息。文献[9]对单脉冲多频率信号和步进频率信号的生命迹象探测进行了数学建模和理论仿真。文献[10]用超宽带脉冲雷达, 利用距离门实现了对运动物体的距离等参数的估计。他们研究了用步进频信号进行生命迹

象探测, 但是没有利用 MTD 滤波及时域、频域联合检测。

本文提出了采用步进频连续波, 利用距离门和 MTD 滤波, 通过时域、频域联合检测的方法实现生命迹象探测。

1 步进频生命迹象探测模型与原理

为了建立步进频连续回波模型, 首先分析人体的微动对回波的影响。

1.1 生命体微动模型

生命迹象探测中人体的呼吸、心跳等大多具有较稳定的频率和摄动幅度, 对回波信号的影响可以较精确地用双谐波相位调制模型来描述。

当采用雷达作为探测器, 目标表面与雷达接收机之间的距离可以表示为:

$$r(t) = r_0 + \Delta r(t) \quad (1)$$

收稿日期: 2008-06-27; 修回日期: 2008-10-20

基金项目: 国家“十一五”预研项目(51307040402)

作者简介: 孔令讲(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事探测与成像、信号检测与估计、宽带雷达理论等方面的研究。

式中 r_0 为人体与雷达接收机之间的平均距离;
 $\Delta r(t) = \sum_{i=1}^2 A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$, 为心跳; $\omega_i = 2\pi f_i$, 为呼吸频率; A_i 为振幅; φ_i 为初始相位。

1.2 步进频连续回波模型

假设发射波形是有 N 个步进频率的连续波 $x(t)$, 起始频率为 f_0 , 步进频率间隔为 Δf , 每步维持持续时间为 T , 则有:

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

设目标是发射系数是 $| \Gamma | e^{j\phi}$ 的点目标(假设目标介电常数不变, 可认为 Γ 为常数), 与接收机间距离为 $r(t)$ (对于人体, $r(t)$ 会随时间变化; 对于静止物体, $r(t)$ 为一固定值 r_s), 则回波会有相应的时延 $\tau(t)$ 。回波信号为:

$$y_1(t) = | \Gamma | e^{j\phi} \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \exp[j2\pi(f_0 + k\Delta f) \times (t - \tau(t))] \right\} \cdots \times \text{rect}\left(\frac{t - \tau(t) - kT - T/2}{T}\right) \quad (3)$$

由式(3), 设电磁波速度为 c , 则时延 $\tau(t)$ 可表示为:

$$\tau(t) = 2r(t)/c = \begin{cases} 2\left(r_0 + \sum_{i=1}^2 A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)\right)/c & \text{目标为人体} \\ 2r_s/c & \text{目标为静止物体} \end{cases} \quad (4)$$

在实际中常常满足 $T \gg \tau(t)$, 则回波信号经过混频下变频、低通滤波后得到复基带信号:

$$y_2(t) = | \Gamma | e^{j\phi} \sum_{k=0}^{N-1} \exp[-j2\pi(f_0 + k\Delta f)\tau(t)] \cdots \times \text{rect}\left(\frac{t - kT - T/2}{T}\right) \quad (5)$$

复基带信号采样后得到复数组:

$$C(k) = | \Gamma | e^{j\phi} \exp[-j2\pi(f_0 + k\Delta f)\tau_k] \quad (6)$$

式中 $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。由式(4)可得:

$$\tau_k = \begin{cases} 2\left(r_0 + \sum_{i=1}^2 A_i \sin(\omega_i t_k + \varphi_i)\right)/c & \text{目标为人体} \\ 2r_s/c & \text{目标为静止物体} \end{cases} \quad (7)$$

数组中每一个分量都是基带信号的一个频率采样值, 式(6)可以表现为离散频域形式:

$$C(f) = | \Gamma | e^{j\phi} \exp[-j2\pi(f_0 + f)\tau_f] \quad (8)$$

式中 $f = 0, \Delta f, 2\Delta f, \dots, (N-1)\Delta f$; τ_k 与 τ_f 等价, τ_k 用于时域表达式, τ_f 用于频域表达式, 下标说明其可能会随时间变化(对于一个步进全周期, 也是随频

率变化)而变化。

通过插入和补零的方法可以得到其带通等效信号为:

$$D(f) = | \Gamma | e^{j\phi} \text{rect}\left[\frac{f - f_c}{B}\right] e^{-j2\pi f \tau_f} \quad (9)$$

式中 B 为发射信号等效脉冲的带宽; f_c 为发射信号等效脉冲的中心频率。

通过逆离散傅里叶变化(IDFT), 把 $D(f)$ 变化到时域:

$$d(t) = \text{IDFT}[D(f)] = | \Gamma | e^{j\phi} B \text{sinc}[B(t - \tau_k)] e^{j2\pi f_c(t - \tau_k)} \quad (10)$$

由于 t 和 r 的一一对应关系, $d(t)$ 反应了距离像的信息。

由此可见, 可以从步进频回波的变化中提取有效信息, 检测人体目标。

1.3 步进频连续波探测原理

为了有效检测人体目标、去除静止目标的影响, 需要进一步利用距离门和MTD滤波。

1.3.1 距离门

由步进频连续波雷达探测原理可知, 通过对回波数据进行 IFFT 运算, 可以得到距离像。获得距离像后即可根据系统的距离分辨单元对回波的距离像划分距离门。然后对各距离门内的信号进行时域检测, 记录可能存在目标的距离门。

为了获得更精确的距离信息, 可以通过在 IFFT 之前补零的方式, 适当选取每距离门内数据点数; 数据点数越多, 对距离变化的描述就越精确, 但同时也增加了计算量, 综合考虑两因素, 选取合适的各距离门数据点数。

1.3.2 MTD滤波及观测时间

传统的脉冲多普勒雷达都是在时域进行滤波处理。但对于生命迹象探测, 在频域进行 MTD 滤波处理同样可以滤除静止目标。而且由于人体的心跳、呼吸可看作双谐波信号, 其频率在一定范围内, 其能量在频域更为集中, 故采用频域 MTD 滤波更好。

一般情况下, 人体心跳的频率范围在 1~2 Hz, 呼吸频率范围在 0.3~0.5 Hz; 静止目标的频谱峰值是在零频附近。所以, 可采用带通滤波器对频域数据进行作 MTD 滤波, 通带范围可选在 0.2~2 Hz。

要能将静止目标较好的滤除, 应避免呼吸信号和静止目标的频谱发生混迭, 需要有一定的观测时间。设积累时间为 T 。在不加窗的情况下, 由于心跳、呼吸和静止目标的频谱都是 sinc 函数, 它们的

第一旁瓣宽度均为 $1/T$ ，为了将呼吸信号和静止目标分开，观测时间至少为 $T = 2/0.3 \approx 6.67$ s。

1.3.3 探测原理及方法

设重复发送 N 步进的连续波 M 个周期，得到 $d_1(t)$ 、 $d_2(t-NT)$ 、 \dots 、 $d_M[t-(M-1)NT]$ ；共划分 K 个距离单元。对每一个 $d_i(t)$ ， $i=1,2,\dots,M$ ，搜寻其每个距离单元 $k(k=1,2,\dots,K)$ 内距离像峰值对应位置 $d_{i_peak,k}$ ，经时域检测，判断有无信号。将有信号的距离门峰值信息存储在矩阵 R_{var} 中：

$$R_{var} = \begin{bmatrix} d_{1_peak,k_1} & d_{1_peak,k_2} & \dots & d_{1_peak,k_p} \\ d_{2_peak,k_1} & d_{2_peak,k_2} & \dots & d_{2_peak,k_p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{M_peak,k_1} & d_{M_peak,k_2} & \dots & d_{M_peak,k_p} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 R_{var} 的每一列表示目标(包括人体、静止目标)所在距离门的峰值信号积累。对 R_{var} 的每一列进行FFT处理后，再对其频域数据进行MTD滤波。由滤波后频域数据可以看到：如果目标是静止物体，滤波后频域数据仅仅是部分旁瓣的残留值，频谱峰值很低；如果目标是人体，频谱有明显峰值，对应心跳和呼吸的频率，从而实现对生命迹象的探测。

具体来说，该探测方法的处理步骤如下：

- (1) 发射步进频率连续波，对第一周期回波补零后作逆傅里叶变换，得到距离像信息。
- (2) 根据最远探测距离和最小距离分辨力，划分距离单元。
- (3) 距离像信息经时域检测，找出有目标的距离门。每距离门内峰值与门限比较，大于门限，则认为该距离门内有目标(包括人体和静止目标)。
- (4) 搜寻有目标的距离门内的峰值信息，并积累。
- (5) 对积累的峰值变化作FFT，获得频谱信息。
- (6) 通过MTD滤波，滤除静止物体的影响。
- (7) 经频域判决检测出人体目标，并估计出人体目标的距离及微动频率信息(心跳、呼吸的频率)。

根据以上分析，得到探测原理框图如图1所示。

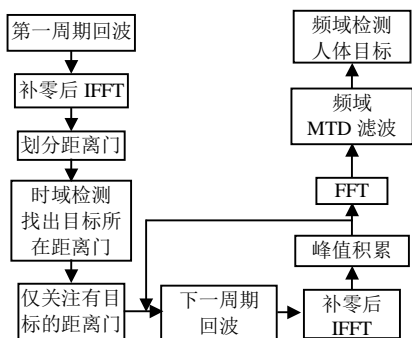


图1 步进频连续波生命迹象探测算法原理框图

2 仿真实验

结合下面的仿真以区分处于不同距离门的静止目标和人体目标，来证实该方法的有效性。

2.1 仿真设置

(1) 设发射步进频率波为1~2.5 GHz，步长为15 MHz，共101个步进，每步进持续100 μs，一个步进全周期为10.1 ms，重复700次，则积累时长为7.07 s。

(2) 人体目标距离接收机5 s(设人的心跳频率为0.3 Hz，幅度1 mm；呼吸频率为1.5 Hz、幅度4 mm)，另有一个静止目标距离接收机3 m。

(3) 由步骤(1)可知，最远探测距离为10 m，最小距离分辨力为10 cm。距离门设置为：从0.05 m到9.95 m，每10 cm为一个距离门，共99个距离门。这是因为目标位置的特殊性，如果从0 m开始，每10 cm为一个距离门，则目标会在两个距离门内出现。实际处理中，可以改变起始距离门的位置来搜索目标。

2.2 仿真结果

回波距离像信息如图2所示，在距离接收机3 m(对应第30个距离单元)和5 m(对应第50个距离单元)处有明显峰值，说明在这两个地方有目标。

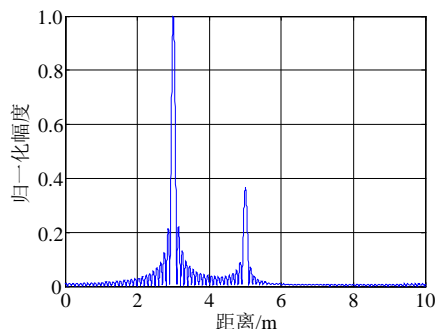


图2 回波距离像信息

图3为静止目标、人体所在距离门内的距离峰值变化信息。可以看出，对于静止目标，距离像峰值始终为一常数；而对于人体目标，距离像峰值有规律的随时间而变化。

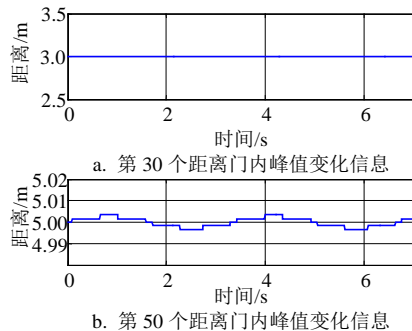


图3 有目标的距离门内峰值变化信息

图4为静止目标、人体所在距离门内的距离峰值信息FFT后所得频谱。可以看出,对于静止目标,所得频谱峰值在零频附近;而对于人体目标,所得频谱峰值在人体微动频率附近(该处为心跳频率0.3 Hz、呼吸频率1.5 Hz)。

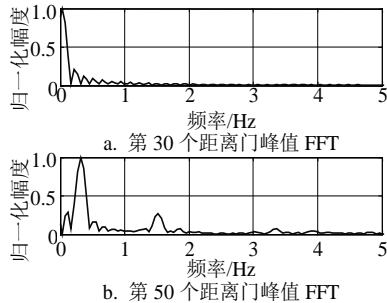


图4 有目标的距离门峰值变化FFT

图5为静止目标、人体所在距离门内的距离峰值信息经FFT后,再通过MTD滤波的频谱。可以看出,对于静止目标,其频谱通过MTD滤波后,滤波后频域数据仅仅是部分旁瓣的残留值,频谱峰值很低;对于人体目标,其频谱有明显峰值,且在人体微动频率附近(心跳频率0.3 Hz、呼吸频率1.5 Hz)。同时可以看到,人体在第50个距离门内,由距离门划分可知,人体目标离雷达接收机为 5 ± 5 cm。

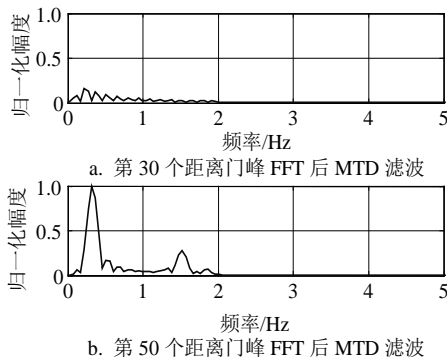


图5 有目标的距离门峰值FFT后MTD滤波

由此可见,这种方法可以有效地排除静止目标的影响,在检测到人体目标的同时,进行测距并得到人体微动的频率信息。

3 结 论

本文提出采用步进频连续波,利用距离门和

MTD滤波,通过时域、频域联合检测,实现生命迹象探测的方法。该方法可以检测到人体目标,并实现测距。但是,该方法在不同信噪比下的检测概率、虚警概率,以及频域MTD滤波与时域MTD滤波的性能对比、分析等问题,还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] GRENEKER E F. Radar sensing of heartbeat and respiration at a distance with applications of the technology[C]//Radar 97. [S.l.]: IEEE, 1997.
- [2] CHEN V C. Micro-doppler effect of micro-motion dynamics: a review[C]//Independent Component Analyses, Wavelets, and Neural Networks Proceedings of SPIE. [S.l.]: SPIE, 2003.
- [3] YAROVOY A G, LIGTHART L P, MATUZAS J, et al. UWB radar for human being detection[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems. 2006, 21(3): 10-14.
- [4] THAYANPARAN T, ABROL S, RISEBOROUGH E. Micro-doppler radar signatures for intelligent target recognition[R]. Canada: DRDC Ottawa, 2004.
- [5] LIN J C. Microwave sensing of physiological movement and volume change: a review[J]. Bioelectromagnetics, 1992, 13: 557-565.
- [6] CHEN Kun-mu, HUANG Yong, ZHANG Jian-ping, et al. Microwave life-detection system for searching human subjects under earthquake rubble or behind barrier[J]. IEEE Trans BME, 2000, 27(1): 105-114.
- [7] GEISHEIMER J, GRENEKER E F. Remote detection of deception using radar vital signs monitor technology[C]//Proceedings, IEEE 34th Annual 2000 International Carnahan Conference. [S.l.]: IEEE, 2000.
- [8] GEOSJEOR J, GRENEKER E F. A non-contact life detector using radar vital signs monitor (RVSM) technology[J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems, 2001, 16(8): 10-14.
- [9] BUGAEV A S, CHAPURSKY V V, IVASHOV S I. Mathematical simulation of remote detection of human breathing and heartbeat by multifrequency radar on the background of local objects reflections[C]//IEEE International Radar. [S.l.]: IEEE, 2005.
- [10] IMMOREEV I Y, SAMKOV S V. Ultra-wideband radar for remote detection and measurement of parameters of the moving objects on small range[C]//Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. [S.l.]: [s.n.], 2004.

编辑 税 红