



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103245976 A

(43) 申请公布日 2013. 08. 14

(21) 申请号 201310196338. 4

(22) 申请日 2013. 05. 23

(71) 申请人 中国人民解放军第四军医大学
地址 710032 陕西省西安市新城区长乐西路
169 号

(72) 发明人 王健琪 吕昊 荆西京 于霄
薛慧君 张华 焦腾 张杨

(74) 专利代理机构 北京众合诚成知识产权代理
有限公司 11246

代理人 龚燮英

(51) Int. Cl.

G01V 3/12 (2006. 01)

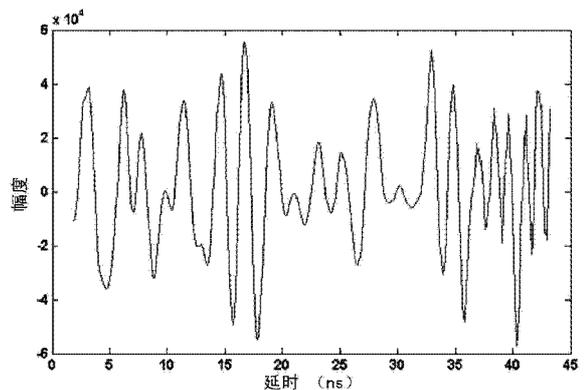
权利要求书3页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

基于 UWB 生物雷达的人体目标与周围环境结构兼容探测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于 UWB 生物雷达的人体目标与周围环境结构兼容探测方法,包括以下步骤:A 预处理步骤;B 人体目标探测步骤;C 结构探测步骤;考虑到地震等灾难发生后压在废墟里的幸存者大多被掩埋在废墟下形成的孔洞,因此幸存者与废墟之间存在着一定的空间,且这个空间内的介质为空气。利用该限定条件和人体目标位置信息,可实现对孔洞上下界面的探测和识别,以期为后续研究中得到更准确、全面的废墟结构信息进行探索,并为 UWB 搜救生物雷达技术的应用和发展提供新的思路。



1. 一种基于 UWB 生物雷达的人体目标与周围环境结构兼容探测方法,其特征在于,包括以下步骤:

A 预处理步骤:

A1 零点校正

自动识别一道回波信号中的最大值,即直达波的尖峰;然后向回波起始延时寻找幅值为零的点,其位置即为时间零点的位置;后续处理将不考虑时间零点前的无意义数据,从而达到了时间零点校正的目的;这一过程可表示为:

$$r_1(t, \tau) = r(t, \tau), \tau \geq \tau_0 \quad (3)$$

式中 τ_0 表示时间零点,即直达波的位置, $r_1(t, \tau)$ 为零点校正后的 UWB 生物雷达回波;

A2 距离积累

距离积累步骤用下式表示:

$$r_2(t, \tau) = \frac{1}{W} \int_0^W r_1(t, \tau - v) dv \quad (4)$$

式中 W 为积累所采用的矩形窗的长度。该长度与 UWB 雷达发射脉冲的宽度密切相关,而且其选择应兼顾人体目标和结构探测的要求。 $r_2(t, \tau)$ 为距离积累后的 UWB 生物雷达回波;

A3 时间平均

时间平均步骤表示为:

$$r_3(t, \tau) = \frac{1}{N} \int_0^N r_2(t - w, \tau) dw \quad (5)$$

式中 N 为时间平均的长度。该长度越大,信噪比改善越好,但 N 的选取应小于人体目标的呼吸周期; $r_3(t, \tau)$ 为零点校正后的 UWB 生物雷达回波,作为预处理步骤的输出用于人体目标探测和结构探测步骤;

B 人体目标探测步骤:

B1 背景去除

由于其不随时间变化,静态回波可以由 UWB 生物雷达回波信号的时间均值有效进行估计,即:

$$r_b(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T r_3(t, \tau) dt \approx \sum_i r_i p(\tau - \tau_i) + n(\tau) \quad (6)$$

式中 T 为 UWB 生物雷达测量时间总长度, $r_b(\tau)$ 为静态回波;由上式可以看出, $r_b(\tau)$ 中包含了废墟分层界面的反射信息 r_i , 将其提取出来就可以实现结构层位的检测;因此 $r_b(\tau)$ 应该作为结构探测步骤的输入;但是在人体目标探测步骤中,静态回波作为背景必须去除,所以背景去除后的 UWB 生物雷达回波 $r_4(t, \tau)$ 可表示为:

$$r_4(t, \tau) = r_3(t, \tau) - r_b(\tau) \approx bp[\tau - \tau_b(t)] + n(t, \tau) \quad (7)$$

B2 低通滤波

选择 121 阶、截止频率为 0.4Hz 的有限冲激响应低通滤波器,在时间上对回波信号进行滤波放大;当 UWB 生物雷达扫速为 64Hz 时,121 阶 FIR 低通滤波器对应的长度约为

1. 89s, 有效跟踪人体呼吸的变化; 这一步可表示为:

$$r_5(t, \tau) = r_4(t, \tau) * h(t) \quad (8)$$

式中为 $h(t)$ 121 阶 FIR 低通滤波器系数, * 代表卷积, $r_5(t, \tau)$ 为滤波后输出的 UWB 生物雷达回波;

B3 目标识别

首先计算 UWB 生物雷达探测范围内各距离上的回波能量 $E(\tau)$:

$$E(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T |r_5(t, \tau)|^2 dt \quad (9)$$

然后, 计算 UWB 生物雷达回波信号的检测信噪比, 即人体目标距离 τ_b 的能量 $E(\tau_b)$ 与噪声能量 E_{nos} 的比值, 后者用 $E(\tau)$ 非目标距离上的最导致进行估计, 即:

$$E_{nos} = \max_{\tau \neq \tau_b} [E(\tau)] \quad (10)$$

当有人体目标时, 计算出的检测信噪比应呈现出较大的值; 反之, 计算出的检测信噪比实际上是噪声和噪声检测比值, 应接近于 1; 根据这一原理, 就能设定阈值进行有无目标的二元假设判断, 当判断为有目标时估计目标距离;

C 结构探测步骤:

C1 衰减补偿

表示为:

$$r_g(\tau) = r_b(\tau) \times G(\tau) \quad (10)$$

式中 $r_b(\tau)$ 为人体目标探测步骤中估计的静态回波, $G(\tau)$ 为增益曲线, $r_g(\tau)$ 为衰减补偿输出;

根据人体目标的位置和相应的反射回波幅值来计算衰减补偿的增益, 并以此来计算指数增益曲线, 然后将增益曲线应用到雷达回波数据, 可以使孔洞上界面的雷达反射回波得到充分的放大; 其具体实现方法如下:

用直达波的幅值 $\max[r_b(\tau)]$ 除以人体目标反射回波的幅值 $r_b(\tau_b)$, 将得到的比值视为雷达回波在位置 τ_b 的理想增益值, 便可以计算出随延时 τ 变化的指数增益曲线:

$$G(\tau) = \exp\left(\frac{\lg(r_b(\tau_b)/\max[r_b(\tau)])}{\tau_b} \times \tau\right) \quad (11)$$

C2 稀疏脉冲反演

根据公式(6), 衰减补偿输出 $r_g(\tau)$ 写成

$$r_g(\tau) = (R * p(t) + n(\tau)) * G(\tau) \quad (12)$$

式中 $\mathbf{R} = \sum_i r_i \delta(\tau - \tau_i)$ 由一系列脉冲组成, 脉冲应出现在两种均匀介质的交界位置。为了从 $r_g(\tau)$ 中得到反射系数 R , 需要进行解卷积运算; 采用稀疏脉冲反演算法来进行这一运算, 通过迭代重加权最小二乘准则实现 l_1 范数最小化:

$$R = \arg \min_f (\|w * f - r_b(\tau)\|_2^2 + \lambda \|f\|_1) \quad (13)$$

式中 λ 为一可调参数, 可以调节解的稀疏度; w 为卷积核, 选用 UWB 生物雷达发射脉冲的波形;

稀疏脉冲反演后, 输出分层结构反射系数, 从而得到直观的分层结构信息; 在此基础上

融入人体目标探测步骤的输出结果,从而实现人体目标与周围结构的兼容探测。

基于 UWB 生物雷达的人体目标与周围环境结构兼容探测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及属于生物雷达或雷达式生命探测技术领域,特别涉及一种基于 UWB 搜救生物雷达的人体目标与周围环境结构兼容探测方法。

背景技术

[0002] 生物雷达是一种用于生命体目标探测和识别的特殊形式雷达,是国际科技界公认的新兴前沿技术。该技术主要以人体为探测目标,以雷达发射的电磁波为载体,能穿透废墟、墙壁等障碍,检测到人体目标的运动,或呼吸、心跳等生命体征引起的体表微动,进而判断有无目标的存在。生物雷达具有非接触、穿透力强、能精确定位的特点,在生物医学、国家安全、应急救援等领域具有广泛的应用前景。

[0003] 生物雷达主要采用窄带连续波(Continuous Wave, CW)和超宽谱(Ultra Wideband, UWB)两种体制的雷达技术。其中, UWB 生物雷达具有较强的穿透能力、良好的近场性能和目标识别能力,已成为目前生物雷达技术的研究热点。相关研究按其应用领域不同大致可分为三类:以临床应用为目的的生命参数的非接触检测和成像技术,用于军事、反恐等的穿墙探测雷达技术,以及用于应急救援的搜救生物雷达技术。特别是搜救生物雷达技术,可用于地震、爆炸、塌方等灾害发生后快速搜寻压在废墟里的幸存人员,能产生重大的经济效益和社会影响。

[0004] 现有的搜救生物雷达技术主要针对生命体目标的探测和识别,而对于目标周围环境进行结构探测的研究尚未见报道。在地震等灾难发生后的应急救援中,搜救生物雷达如果可以在探测人体目标的同时,获取人体目标周围废墟的结构信息,便可以帮助救援人员制定最优的救援计划,避免救援过程中由于不合理操作导致对压埋者的二次伤害,从而在最短时间内、更有效、更安全地对幸存人员进行救援。

发明内容

[0005] 本发明旨在提供一种能兼容生命体目标和周围环境结构探测的搜救生物雷达技术。该技术基于性能良好的冲激脉冲 UWB 雷达,既能通过对人体呼吸运动的检测实现人体目标的探测,又能通过结构探测算法获取废墟的粗略结构信息,从而在一定程度上帮助救援人员优化救援计划,提高救援效率。

[0006] 本发明的技术方案如下:

[0007] 一种基于 UWB 生物雷达的人体目标与周围环境结构兼容探测方法,包括以下步骤:

[0008] A 预处理步骤:

[0009] A1 零点校正

[0010] 自动识别一道回波信号中的最大值,即直达波的尖峰;然后向回波起始延时寻找幅值为零的点,其位置即为时间零点的位置;后续处理将不考虑时间零点前的无意义数据,

从而达到了时间零点校正的目的;这一过程可表示为:

$$[0011] \quad r_1(t, \tau) = r(t, \tau), \tau \geq \tau_0 \quad (3)$$

[0012] 式中 τ_0 表示时间零点,即直达波的位置, $r_1(t, \tau)$ 为零点校正后的 UWB 生物雷达回波;

[0013] A2 距离积累

[0014] 距离积累步骤用下式表示:

$$[0015] \quad r_2(t, \tau) = \frac{1}{W} \int_0^W r_1(t, \tau - v) dv \quad (4)$$

[0016] 式中 W 为积累所采用的矩形窗的长度。该长度与 UWB 雷达发射脉冲的宽度密切相关,而且其选择应兼顾人体目标和结构探测的要求。 $r_2(t, \tau)$ 为距离积累后的 UWB 生物雷达回波;

[0017] A3 时间平均

[0018] 时间平均步骤表示为:

$$[0019] \quad r_3(t, \tau) = \frac{1}{N} \int_0^N r_2(t - w, \tau) dw \quad (5)$$

[0020] 式中 N 为时间平均的长度。该长度越大,信噪比改善越好,但 N 的选取应小于人体目标的呼吸周期; $r_3(t, \tau)$ 为零点校正后的 UWB 生物雷达回波,作为预处理步骤的输出用于人体目标探测和结构探测步骤;

[0021] B 人体目标探测步骤:

[0022] B1 背景去除

[0023] 由于其不随时间变化,静态回波可以由 UWB 生物雷达回波信号的时间均值有效进行估计,即:

$$[0024] \quad r_b(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T r_3(t, \tau) dt \approx \sum_i r_i p(\tau - \tau_i) + n(\tau) \quad (6)$$

[0025] 式中 T 为 UWB 生物雷达测量时间总长度, $r_b(\tau)$ 为静态回波;由上式可以看出, $r_b(\tau)$ 中包含了废墟分层界面的反射信息 r_i , 将其提取出来就可以实现结构层位的检测;因此 $r_b(\tau)$ 应该作为结构探测步骤的输入;但是在人体目标探测步骤中,静态回波作为背景必须去除,所以背景去除后的 UWB 生物雷达回波 $r_4(t, \tau)$ 可表示为:

$$[0026] \quad r_4(t, \tau) = r_3(t, \tau) - r_b(\tau) \approx bp[\tau - \tau_b(t)] + n(t, \tau) \quad (7)$$

[0027] B2 低通滤波

[0028] 选择 121 阶、截止频率为 0.4Hz 的有限冲激响应低通滤波器,在时间上对回波信号进行滤波放大;当 UWB 生物雷达扫速为 64Hz 时,121 阶 FIR 低通滤波器对应的时间长度约为 1.89s,有效跟踪人体呼吸的变化;这一步可表示为:

$$[0029] \quad r_5(t, \tau) = r_4(t, \tau) * h(t) \quad (8)$$

[0030] 式中为 $h(t)$ 121 阶 FIR 低通滤波器系数, * 代表卷积, $r_5(t, \tau)$ 为滤波后输出的 UWB 生物雷达回波;

[0031] B3 目标识别

[0032] 首先计算 UWB 生物雷达探测范围内各距离上的回波能量 $E(\tau)$:

$$[0033] \quad E(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T |r_b(t, \tau)|^2 dt \quad (9)$$

[0034] 然后, 计算 UWB 生物雷达回波信号的检测信噪比, 即人体目标距离 τ_b 的能量 $E(\tau_b)$ 与噪声能量 E_{nos} 的比值, 后者用 $E(\tau)$ 非目标距离上的最导致进行估计, 即:

$$[0035] \quad E_{nos} = \max_{\tau \neq \tau_b} [E(\tau)] \quad (10)$$

[0036] 当有人体目标时, 计算出的检测信噪比应呈现出较大的值; 反之, 计算出的检测信噪比实际上是噪声和噪声检测比值, 应接近于 1; 根据这一原理, 就能设定阈值进行有无目标的二元假设判断, 当判断为有目标时估计目标距离;

[0037] C 结构探测步骤:

[0038] C1 衰减补偿

[0039] 表示为:

$$[0040] \quad r_g(\tau) = r_b(\tau) \times G(\tau) \quad (10)$$

[0041] 式中 $r_b(\tau)$ 为人体目标探测步骤中估计的静态回波, $G(\tau)$ 为增益曲线, $r_g(\tau)$ 为衰减补偿输出;

[0042] 根据人体目标的位置和相应的反射回波幅值来计算衰减补偿的增益, 并以此来计算指数增益曲线, 然后将增益曲线应用到雷达回波数据, 可以使孔洞上界面的雷达反射回波得到充分的放大; 其具体实现方法如下:

[0043] 用直达波的幅值 $\max[r_b(\tau)]$ 除以人体目标反射回波的幅值 $r_b(\tau_b)$, 将得到的比值视为雷达回波在位置 τ_b 的理想增益值, 便可以计算出随延时 τ 变化的指数增益曲线:

$$[0044] \quad G(\tau) = \exp\left(\frac{\lg(r_b(\tau_b)/\max[r_b(\tau)])}{\tau_b} \times \tau\right) \quad (11)$$

[0045] C2 稀疏脉冲反演

[0046] 根据公式(6), 衰减补偿输出 $r_g(\tau)$ 写成

$$[0047] \quad r_g(\tau) = (R * p(t) + n(\tau)) * G(\tau) \quad (12)$$

[0048] 式中 $R = \sum_i r_i \delta(\tau - \tau_i)$ 由一系列脉冲组成, 脉冲应出现在两种均匀介质的交界位置。为了从 $r_g(\tau)$ 中得到反射系数 R , 需要进行解卷积运算; 采用稀疏脉冲反演算法来进行这一运算, 通过迭代重加权最小二乘准则实现 l_1 范数最小化;

$$[0049] \quad R = \arg \min_f (\|w * f - r_b(\tau)\|_2^2 + \lambda \|f\|_1) \quad (13)$$

[0050] 式中 λ 为一可调参数, 可以调节解的稀疏度; w 为卷积核, 选用 UWB 生物雷达发射脉冲的波形;

[0051] 稀疏脉冲反演后, 输出分层结构反射系数, 从而得到直观的分层结构信息; 在此基础上融入人体目标探测步骤的输出结果, 从而实现人体目标与周围结构的兼容探测。

[0052] 本发明所涉及的 UWB 搜救生物雷达采用冲激脉冲体制, 具有结构简单、功耗小、成本低等优点。此外, 发射脉冲的宽度控制在 ns 级别, 对应的中心频率和频谱宽度均为 500MHz。由于频率较低, 既能提高搜救生物雷达的穿透能力, 而且保证足够的距离分辨率。

[0053] 冲激脉冲 UWB 生物雷达对生命体目标的探测和识别主要基于人体呼吸引起的体表微动的检测, 针对这一问题已有比较成熟的信号处理技术和算法可供参考。因此, 在生命

体目标和周围环境结构的兼容探测中,难点在于基于废墟等静态目标检测的周围环境结构探测技术。UWB 搜救生物雷达一般只能在废墟表面某个固定地点进行探测,并且缺乏废墟结构的先验知识,所以本发明从废墟结构的简要信息着眼。而且考虑到地震等灾难发生后压在废墟里的幸存者大多被掩埋在废墟下形成的孔洞,因此幸存者与废墟之间存在着一定的空间,且这个空间内的介质为空气。利用该限定条件和人体目标位置信息,可实现对孔洞上下界面的探测和识别,以期为后续研究中得到更准确、全面的废墟结构信息进行探索,并为 UWB 搜救生物雷达技术的应用和发展提供新的思路。

附图说明

- [0054] 图 1 为 UWB 生物雷达回波信号模型 ;
 [0055] 图 2 为 UWB 生物雷达回波信号处理算法流程 ;
 [0056] 图 3 为 UWB 生物雷达的一道回波信号 ;
 [0057] 图 4 为人体目标探测模块低通滤波输出的 UWB 生物雷达回波信号 ;
 [0058] 图 5 为输入结构探测模块的 UWB 生物雷达回波信号 ;
 [0059] 图 6 为衰减补偿后的 UWB 生物雷达回波信号 ;
 [0060] 图 7 为兼容探测输出的最终结果。

具体实施方式

[0061] 以下结合具体实施例,对本发明进行详细说明。

[0062] 实施例 1

[0063] 本实施例对 UWB 生物搜救生物雷达的探测过程及其回波信号模型进行简单说明:地震等灾难发生后压在废墟下的幸存人员,大多被掩埋在废墟下形成的孔洞中。因此幸存者与废墟之间存在着一定的空间,而这个空间内的介质即为空气。如果可以确定废墟下这个孔洞的高度,就可以估计出废墟的厚度。这些信息虽然还不是全面的废墟结构信息,但是将有效帮助救援人员制定最优的救援计划。结构探测可以直接使用人体目标探测时采集的 UWB 生物雷达回波信号进行处理和提取,而不需要重新采集,从而为救援争取宝贵的时间。

[0064] 如图 1 所示,UWB 生物雷达回波为包含时间和距离(延时)信息的二维信号。当其探测范围内存在一个平静呼吸的人体目标,雷达回波信号主要由以下三部分组成:人体目标反射回波;探测范围内的废墟等静止目标反射和散射形成的静态回波;其他各种噪声。因此,UWB 雷达人体回波信号模型可表示为:

$$[0065] \quad r(t, \tau) = \sum_i r_i p(\tau - \tau_i) + b p[\tau - \tau_b(t)] + n(t, \tau) \quad \dots\dots (1)$$

[0066] 上式右侧依次为静态回波、人体目标回波和噪声。其中, r_i 和 b 分别为废墟等静止目标以及人体反射系数、 $p(\tau)$ 为脉冲函数。理论上,静态回波的延时 τ_i 不随时间变化;而人体目标回波由于呼吸引起的人体体表微动,其延时 $\tau_b(t)$ 随时间变化,并且该变化对应人体呼吸呈现准周期缓变的特征;噪声 $n(t, \tau)$ 一般具有较强的随机性。 τ 和 t 分别对应 UWB 生物雷达的时间和延时。目标相对雷达的径向距离可按下式计算获得:

$$d = \frac{c\tau}{2\epsilon_r} \quad \dots\dots (2)$$

[0067] 式中 d 为径向距离, c 为光速, ϵ_r 为电磁脉冲传播介质的相对介电常数。

[0068] 根据呼吸引起的人体回波延时随时间的变化, 可以检测出人体呼吸信号, 并以此为依据探测人体目标。而废墟结构的分层界面信息包含在静态回波的反射系数 r_1 及其延时 τ_1 中。

[0069] 实施例 2

[0070] 本实施例对实现兼容探测所需的 UWB 生物雷达回波信号处理算法进行详细说明:

[0071] 如图 2 所示, 该算法包括预处理、人体目标探测和结构探测三个功能模块。UWB 生物雷达采集到的回波信号首先被送入预处理模块, 进行信号校正并提高信噪比。人体目标探测模块中需要去除的静态回波可作为结构探测模块的输入, 同时该模块中探测到的人体目标位置在结构探测模块中作为参考进行回波衰减校正。最终输出包含人体目标及其所在孔洞上下界面距离信息的探测结果。

[0072] 2.1 预处理模块

[0073] 1. 零点校正

[0074] UWB 生物雷达回波中的距离信息是用脉冲在雷达和目标间的双程走时度量的。因此在回波处理过程中, 必须保证信号起始时间与时间零点一致, 这就需要对时间零点的位置进行校正, 然后依此为参考计算探测到的人体目标和孔洞上界面的位置。

[0075] 图 3 为 UWB 生物雷达某一时间采集的一道回波信号, 其中时间零点的位置理论上与直达波到达的时间相同。因此零点校正的具体方法如下:

[0076] 自动识别一道回波信号中的最大值, 即直达波的尖峰; 然后向回波起始延时寻找幅值为零的点, 其位置即为时间零点的位置; 后续处理将不考虑时间零点前的无意义数据, 从而达到了时间零点校正的目的。这一过程可表示为:

$$[0077] \quad r_1(t, \tau) = r(t, \tau), \quad \tau \geq \tau_0 \quad (3)$$

[0078] 式中 τ_0 表示时间零点, 即直达波的位置, $r_1(t, \tau)$ 为零点校正后的 UWB 生物雷达回波。

[0079] 2. 距离积累

[0080] UWB 雷达回波数据中包含大量的杂波和噪声, 会对人体目标微弱回波信号的探测造成干扰。而且远端数据的零点漂移会导致其在衰减补偿之后产生严重的翘尾现象, 影响结构探测结果的解释。因此需要对回波在距离(延时)上进行积累, 改善回波信噪比的同时对零点漂移进行抑制。该步骤可用下式表示:

$$[0081] \quad r_2(t, \tau) = \frac{1}{W} \int_0^W r_1(t, \tau - v) dv \quad (4)$$

[0082] 式中 W 为积累所采用的矩形窗的长度。该长度与 UWB 雷达发射脉冲的宽度密切相关, 而且其选择应兼顾人体目标和结构探测的要求。 $r_2(t, \tau)$ 为距离积累后的 UWB 生物雷达回波。

[0083] 3. 时间平均

[0084] 除距离积累外, 在时间上进行平均也能改善 UWB 生物雷达回波的信噪比, 有利于人体目标和结构的探测。该步骤可表示为:

$$[0085] \quad r_3(t, \tau) = \frac{1}{N} \int_0^N r_2(t - w, \tau) dw \quad (5)$$

[0086] 式中 N 为时间平均的长度。该长度越大,信噪比改善越好,但 N 的选取应小于人体目标的呼吸周期。 $r_3(t, \tau)$ 为零点校正后的 UWB 生物雷达回波,作为预处理模块的输出用于人体目标探测和结构探测模块。

[0087] 2.2 人体目标探测模块

[0088] 1. 背景去除

[0089] 在人体目标探测中,废墟等静态目标反射和散射产生的静态回波作为背景具有较强的能量,将人体目标回波淹没在其中,因此在该模块中必须进行去除。由于其不随时间变化,静态回波可以由 UWB 生物雷达回波信号的时间均值有效进行估计,即:

$$[0090] \quad r_b(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T r_3(t, \tau) dt \approx \sum_i r_i p(\tau - \tau_i) + n(\tau) \quad (6)$$

[0091] 式中 T 为 UWB 生物雷达测量时间总长度, $r_b(\tau)$ 为静态回波。由上式可以看出, $r_b(\tau)$ 中包含了废墟分层界面的反射信息 r_i , 将其提取出来就可以实现结构层位的检测。因此 $r_b(\tau)$ 应该作为结构探测模块的输入。但是在人体目标探测模块中,静态回波作为背景必须去除,所以背景去除后的 UWB 生物雷达回波 $r_4(t, \tau)$ 可表示为:

$$[0092] \quad r_4(t, \tau) = r_3(t, \tau) - r_b(\tau) \approx bp[\tau - \tau_b(t)] + n(t, \tau) \quad (7)$$

[0093] 2. 低通滤波

[0094] 利用人体呼吸的准周期缓变特征,采用低通滤波器进行滤波,可有效抑制噪声,放大人体目标回波信号。本发明选择 121 阶、截止频率为 0.4Hz 的有限冲激响应(Finite Impulse Response, FIR)低通滤波器,在时间上对回波信号进行滤波放大。当 UWB 生物雷达扫速为 64Hz 时,121 阶 FIR 低通滤波器对应的时间长度约为 1.89s,可有效跟踪人体呼吸的变化。这一步可表示为:

$$[0095] \quad r_5(t, \tau) = r_4(t, \tau) * h(t) \quad (8)$$

[0096] 式中 $h(t)$ 为 121 阶 FIR 低通滤波器系数, $*$ 代表卷积, $r_5(t, \tau)$ 为滤波后输出的 UWB 生物雷达回波

[0097] 3. 目标识别

[0098] 低通滤波后人体目标信号得到增强,由于人体呼吸作用导致 UWB 生物雷达回波中人体目标距离附近表现出明显的周期性起伏,这些距离点上的能量将明显高于无目标区域。因此,通过能量识别就能判断目标的有无,进而获得目标的距离信息。为实现这一目的,首先计算 UWB 生物雷达探测范围内各距离上的回波能量 $E(\tau)$:

$$[0099] \quad E(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T |r_5(t, \tau)|^2 dt \quad (9)$$

[0100] 然后,计算 UWB 生物雷达回波信号的检测信噪比,即人体目标距离 τ_b 的能量 $E(\tau_b)$ 与噪声能量 E_{nos} 的比值,后者用 $E(\tau)$ 非目标距离上的最导致进行估计,即:

$$[0101] \quad E_{nos} = \max_{\tau \neq \tau_b} \{E(\tau)\} \quad (10)$$

[0102] 当有人体目标时,计算出的检测信噪比应呈现出较大的值;反之,计算出的检测信噪比实际上是噪声和噪声检测比值,应接近于 1。根据这一原理,就能设定阈值进行有无目标的二元假设判断,当判断为有目标时估计目标距离。

[0103] 2.3 结构探测模块

[0104] 1. 衰减补偿

[0105] 由于废墟等有耗介质对 UWB 生物雷达波的衰减作用,导致远端界面的反射回波幅值大幅减小,甚至无法进行探测和识别,因此需要在识别界面反射回波之前,对雷达回波进行增益调节以补偿衰减。这一步可表示为:

$$[0106] \quad r_g(\tau) = r_b(\tau) \times G(\tau) \quad (10)$$

[0107] 式中 $r_b(\tau)$ 为人体目标探测模块中估计的静态回波, $G(\tau)$ 为增益曲线, $r_g(\tau)$ 为衰减补偿输出。

[0108] 由于缺乏废墟结构的先验知识,不准确的增益曲线将会导致噪声被过度放大,而真正的界面反射回波却可能因为增益较小得不到放大,最终导致分层界面误识别和漏识别的概率大大增加。但是本模块可利用人体目标探测模块获得的人体目标位置作为先验知识,只对孔洞与空气之间的界面反射回波进行适当放大,从而保证在界面与人体之间的噪声不被过度放大。

[0109] 此外,人体目标的雷达反射回波幅值远小于孔洞上界面的雷达反射回波幅值。因此,根据人体目标的位置和相应的反射回波幅值来计算衰减补偿的增益,并以此来计算指数增益曲线,然后将增益曲线应用到雷达回波数据,可以使孔洞上界面的雷达反射回波得到充分的放大。其具体实现方法如下:

[0110] 用直达波的幅值 $\max[r_b(\tau)]$ (通常也是一道雷达回波信号的最大值)除以人体目标反射回波的幅值 $r_b(\tau_b)$ (即雷达回波中人体目标位置对应的幅值),将得到的比值视为雷达回波在位置 τ_b 的理想增益值,便可以计算出随延时 τ 变化的指数增益曲线:

$$[0111] \quad G(\tau) = \exp\left(\frac{\lg(r_b(\tau_b)/\max[r_b(\tau)])}{\tau_b} \times \tau\right) \quad \dots\dots (11)$$

[0112] 2. 稀疏脉冲反演

[0113] 根据(6),衰减补偿输出 $r_g(\tau)$ 可以写成

$$[0114] \quad r_g(\tau) = (R * p(t) + n(\tau)) * G(\tau) \quad (12)$$

[0115] 式中 $\mathbf{R} = \sum_i r_i \delta(\tau - \tau_i)$ 由一系列脉冲组成,脉冲应出现在两种均匀介质的交界位置。为了从 $r_g(\tau)$ 中得到反射系数 R ,需要进行解卷积运算。本模块采用稀疏脉冲反演算法来进行这一运算,通过迭代重加权最小二乘准则实现 l_1 范数最小化。

$$[0116] \quad R = \arg \min_f (\|w * f - r_b(\tau)\|_2^2 + \lambda \|f\|_1) \quad \dots\dots (13)$$

[0117] 式中 λ 为一可调参数,可以调节解的稀疏度。 w 为卷积核,选用 UWB 生物雷达发射脉冲的波形。

[0118] 稀疏脉冲反演后,输出分层结构反射系数,从而得到直观的分层结构信息。在此基础上融入人体目标探测模块的输出结果,从而实现人体目标与周围结构的兼容探测。

[0119] 实例 3

[0120] 本实例在某一模拟废墟中对上述实例所描述的方法的效能进行验证:该模拟废墟为砖混结构,总厚度 1.8m,废墟下有一孔洞,孔洞高 0.8m,孔洞上方废墟厚度为 1m。某正常男性人体目标平躺在孔洞中平静呼吸,雷达被置于废墟上方,正对孔洞的位置进行探测。

[0121] 图 4 为 UWB 生物雷达回波信号经人体目标探测模块处理,低通滤波输出的结果,图中可见明显的人体呼吸运动,识别得到的人体目标位置为 32.52ns,以此为参考在结构探测

模块中进行衰减补偿。

[0122] 图 5 为结构探测模块的输入,即人体目标探测模块估计出的静态回波。

[0123] 图 6 为经过衰减补偿后的 UWB 生物雷达回波信号。

[0124] 图 7 为经过稀疏脉冲反演后最终输出的结果。从图中可以看出,通过稀疏脉冲反演,可以得到直观的反射系数,从而实现分层界面的识别。

[0125] 根据电磁波在介质中的传播理论,当电磁波从废墟进入空气的时候,是从高介电常数的介质(空气)进入低介电常数的介质(废墟),在界面产生的反射回波极性与雷达发射脉冲(直达波)极性相反;而当雷达波从低介电常数的介质(空气)进入高介电常数的介质(废墟),界面反射回波极性与直达波相同。因此,图中人体目标前后有一对幅值较强的脉冲应为孔洞上下界面。上界面反射回波与直达波极性相反,下界面反射回波与直达波极性相同。探测得到的孔洞上、下界面位置分别为 27.28ns 和 34.78ns。将两者差值带入公式(2),而校正过的空气相对介电常数为 1.465,计算得到的孔洞高度 0.77m,与实际相符。

[0126] 应当理解的是,对本领域普通技术人员来说,可以根据上述说明加以改进或变换,而所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

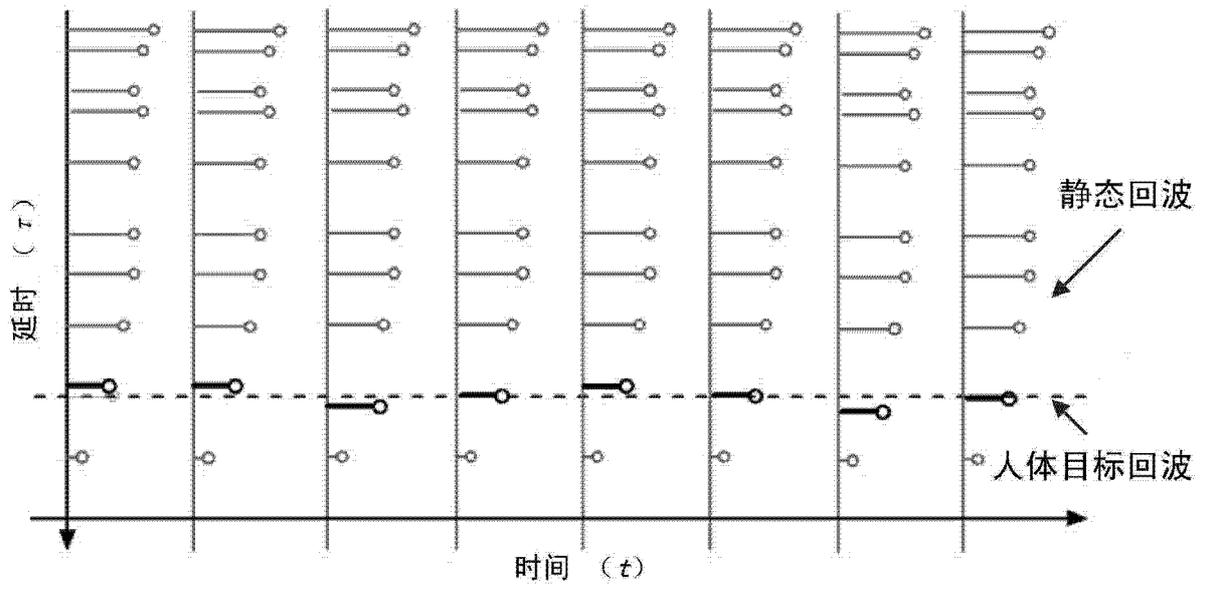


图 1

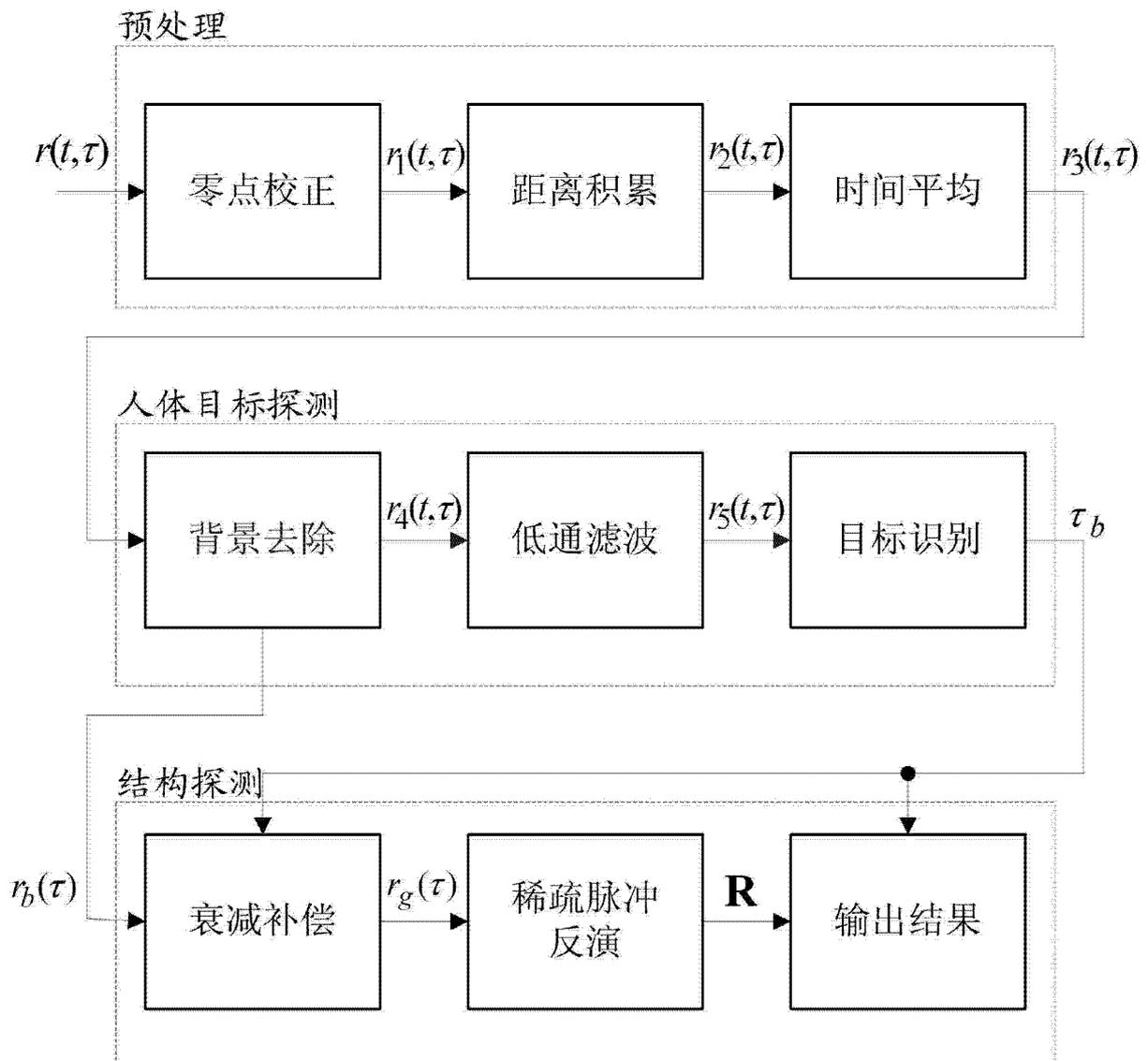


图 2

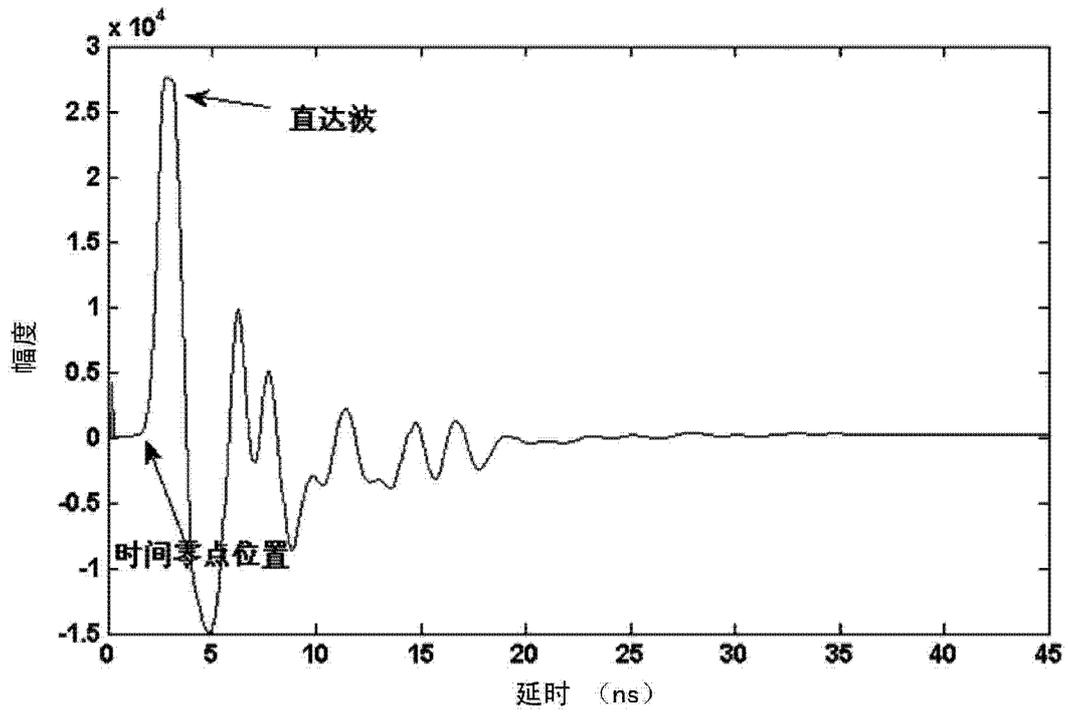


图 3

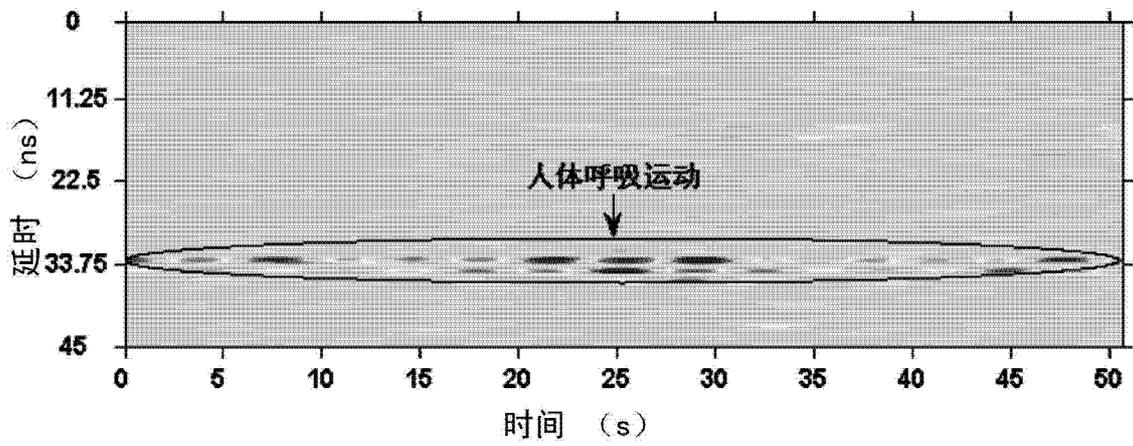


图 4

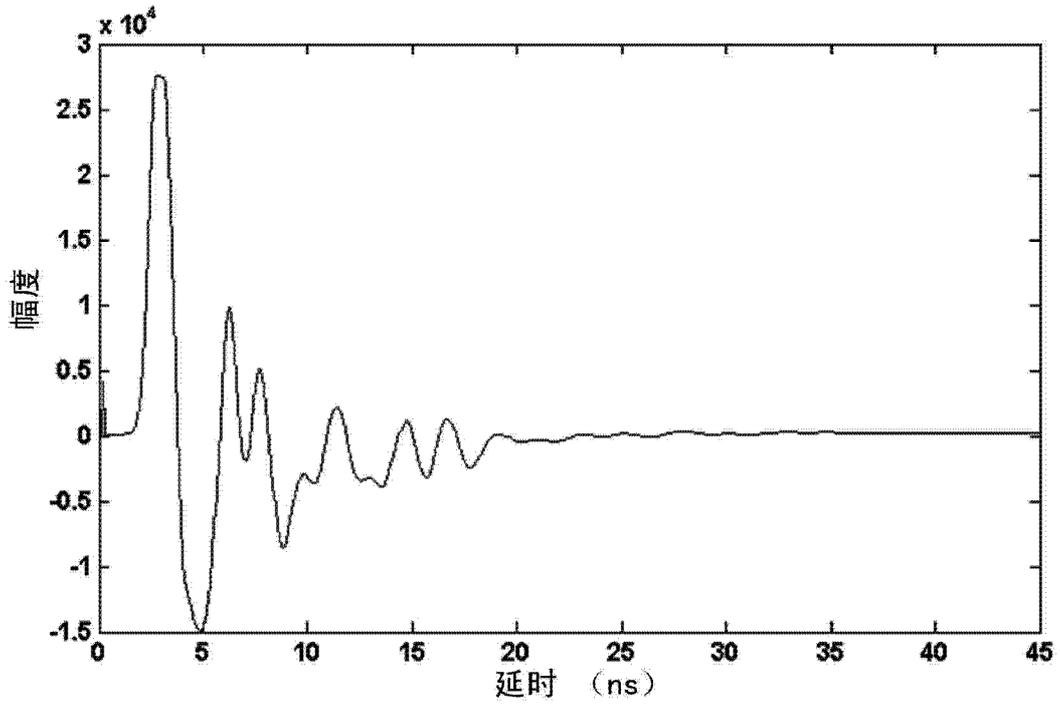


图 5

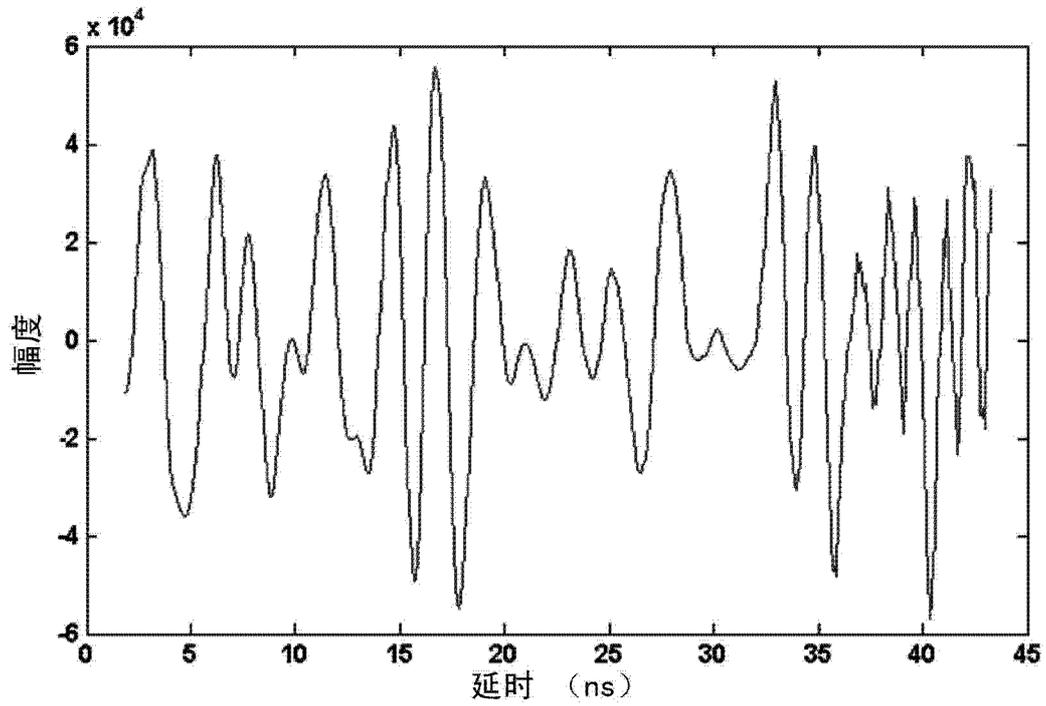


图 6

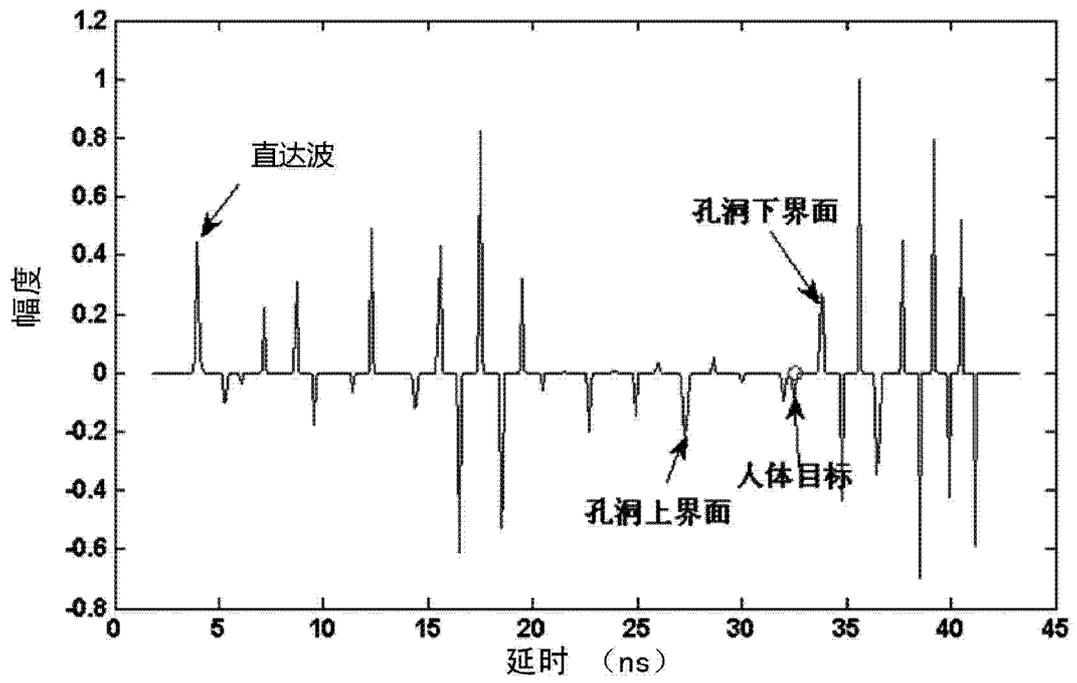


图 7