

一种基于太赫兹脉冲频谱与最优化算法的涂层厚度测量方法

技术领域

本发明涉及太赫兹脉冲信号处理及涂层厚度测量领域，尤其涉及一种基于太赫兹脉冲频谱与遗传算法的涂层厚度测量算法。

背景技术

太赫兹波在电磁波谱中介于微波与红外光波之间，属于远红外波段，通常认为它的频率范围在 $0.1\text{THz}\sim 10\text{THz}$ ，波长范围在 $0.03\sim 3\text{mm}$ ，太赫兹的特殊位置决定了太赫兹科学综合了电子学与光子学的特色，是典型的前沿交叉学科，研究太赫兹波的机理和应用方法，具有重大的科学意义。

太赫兹波对非极性材料具有很好的穿透性，并且光子能量低，对人体安全，同时，太赫兹脉冲信号具有超短脉冲特性，具有极高的空间和时间分辨率。此外，太赫兹波还具有指纹谱特性，在测量材料的几何参数的同时还可以测量材料的化学成分。太赫兹时域光谱技术日趋成熟，也是目前太赫兹技术中应用于无损检测最广泛的一种技术。

各种涂层常用来保护某些产品的外观和使用性能，在汽车行业尤其重要，其厚度一般大于 $10\mu\text{m}$ 。在现代工业生产过程中，喷涂技术是一项很重要的技术，广泛应用于汽车生产、航空航天、装饰、医药等领域。因此，监测涂层质量有着重要的实际意义。其中，涂层厚度是监测喷涂质量的一项重要指标，涂层过厚会造成涂料的浪费，增加生产成本，涂料过薄就不能达到预期的要求。目前的涂层测厚技术有着各方面的缺点，寻找一种非接触、高精度、安全的无损检测技术是很必要的。

与确定性寻优算法相比，随机优化方法提供了诸多便利。该类算法基于随机性、统计性和概率性，增大了得到全局最优值的概率，对于不可微、非连续、非线性、噪声和多维的目标函数，具有复杂的局部极小值的搜索空间。目前较为成熟的随机优化算法有差分进化算法 DE，遗传算法 GA，粒子群优化算法 PSO。

在太赫兹材料检测领域，如何对获得的太赫兹信号进行有效准确的分析是其中的关键。太赫兹波在材料中的飞行时间与材料厚度直接相关，通过厚度信息可以计算材料的光学折射率。GA、DE 等随机优化算法的发展，为求解材料的光学参数提供了更加稳定可靠的选择，借助计算机便可实现参数的自动计算。而在绝大多数应用 TDS 技术进行检测的案例中，太赫兹波在样品中会发生多次反射，多余的反射峰将会影响材料光学参数的计算精度。因此，研究如何减少或消去多重反射效应具有重要的实际意义。

发明内容

本发明提出了一种基于最优化算法的高精度太赫兹脉冲时域光谱涂层厚度测量方法,包括以下步骤:

S1: 用太赫兹时域光谱系统获得空载状态下的参考信号 $E_{ref}(t)$ 和涂层样品测量信号 $E_{mea}(t)$;

S2: 将参考信号 $E_{ref}(t)$ 和涂层样品的测量信号 $E_{mea}(t)$ 输入计算机;

S3: 用 EEMD 算法对输入两类信号进行降噪,减少信号中误差成分,降低后续过程中的拟合误差;

S3.1: 在原始测量信号 $E_{mea}(t)$ 和参考信号 $E_{ref}(t)$ 内加入白噪声;

S3.2: 分别进行 EMD 分解,得到一系列的本征模态分量 $c_n(t)$ 和余项 $R_n(t)$;

S3.3: 重复上述步骤,一共进行 k 次,每次加入不同的白噪声,白噪声服从 $(0, \alpha^2 \varepsilon^2)$ 的正态分布,其中 α 为附加噪声的标准偏差与输入信号的标准偏差之比,取 $\alpha = 0.2$, $k = 150$;

S3.4: 将 k 次分解得到的本征模态函数进行整体求均值,得到测量信号 $E_{mea}(t)$ 和参考信号 $E_{ref}(t)$ 的 EMD 分解结果,对分解结果进行信号重建,获得重建后的测量信号和参考信号,分别记作 $E_{eemd-mea}(t)$ 和 $E_{eemd-ref}(t)$ 。

S4: 设定初始参数,如涂层样品类型、初始误差等;

S5: 用最优化算法求解拟合信号。

S5.1: 对待求信号 $E_{obj}(t)$ 进行建模。

$$E_{obj}(t) = E_1(t) + E_2(t) = k_1 E_{eemd-ref}(t + \Delta t_1) + k_2 E_{eemd-ref}(t + \Delta t_2)$$

$$E_1(t) = k_1 E_{eemd-ref}(t + \Delta t_1)$$

$$E_2(t) = k_2 E_{eemd-ref}(t + \Delta t_2)$$

$E_1(t)$ 为由涂层表层反射的反射信号,为第一级反射信号, $E_2(t)$ 为由基底第一次反射所得的反射信号,为第二级反射信号, k_1 、 k_2 为根据菲涅尔定律与介质对太赫兹信号吸收性所确定的系数, Δt_1 、 Δt_2 为反射信号 $E_1(t)$ 、 $E_2(t)$ 对应的飞行时间,规定 $\Delta t_2 > \Delta t_1$;

S5.2: 对太赫兹脉冲信号在样品内的多重反射效应进行建模;

由于太赫兹波在涂层中发生了多次反射, 信号接收端将接收到多个具有不同飞行时间的反射信号, $E_2(t)$ 之后的反射信号会影响测量精度, 因此, 需要尽可能消去 $E_2(t)$ 之后的反射信号, 当信号发生多重反射时, 各个反射信号之间的飞行时间差为定值 $dt = \Delta t_2 - \Delta t_1$,

由此可知:

$$E_3(t) = k_3 E_{eemd-ref}(t + \Delta t_2 + dt), \quad E_4(t) = k_4 E_{eemd-ref}(t + \Delta t_2 + 2 \times dt),$$

其中, $E_3(t)$ 、 $E_4(t)$ 为由涂层基底第二次、第三次反射回来的太赫兹波, 分别是第三级、四级反射信号, 与 k_1 、 k_2 同理可得系数 k_3 、 k_4 , 因此, 第 i 级多重反射信号为:

$$E_i(t) = k_i E_{eemd-ref}(t + \Delta t_2 + (i - 2) \times dt),$$

其中 $i > 2$, 对 E_i 求和, 得到包含所有多重反射信号的总拟合信号:

$$E_{sim}(t) = E_1(t) + E_2(t) + \sum_i E_i(t) = E_{obj}(t) + \sum_i E_i(t)$$

S5.3: 令误差函数 Y 达到最小值, 获取最优拟合信号 $E_{best-sim}(t)$;

误差函数 Y 定义为:

$$Y = \sum_j (E_{eemd-mea}(t_j) - E_{sim}(t_j))^2$$

将误差函数 Y 作为最优化算法的目标函数, 在每一次循环中, 向总拟合信号 $E_{sim}(t)$ 中加入反射信号 $E_i(t)$, 其中 $i > 2$, 使 $E_{sim}(t)$ 更接近获取的测量信号 $E_{eemd-mea}(t)$, 从而降低误差函数 Y 的值, 直至 Y 值不再明显减少, 获得与测量信号 $E_{eemd-mea}(t)$ 相比误差最小的最优拟合信号 $E_{best-sim}(t) = E_1(t) + E_2(t) + \sum_i E_i(t)$ 、参数 k_i 、 Δt_1 、 Δt_2 以及引入的反射信号级数 n 。

S6: 输出拟合结果, 通过消去拟合信号中多余的反射信号获得待求信号 $E_{obj}(t)$, 计算涂层厚度。

S6.1: 消除多重反射信号的混叠, 获取待求信号 $E_{obj}(t) = E_1(t) + E_2(t)$;

S6.2: 计算涂层厚度 d 。

附图说明

通过参考附图会更清楚的理解本发明的特征和优点，附图是示意性的而不应对理解为对本发明的任何限制，附图是利用本算法处理信号的一个具体实例：

图 1 为涂层厚度求解算法流程图

图 2 为 EEMD 算法流程图

图 3 为 EEMD 降噪前后信号对比图；

图 4 为具有不同飞行时间的太赫兹信号示意图；

图 5 为多重反射效应示意图

图 6 为最优化算法拟合信号与测量信号对比图；

图 7 为各反射信号的求解结果；

图 8 为误差随迭代次数变化图；

图 9 为消去多余反射峰之后的测量信号与原信号对比图；

图 10 为拟合结果示例图

具体实施方式

S1：用太赫兹时域光谱系统获得空载状态下的参考信号 $E_{ref}(t)$ 和涂层样品测量信号 $E_{mea}(t)$ ；

利用太赫兹时域反射光谱（THz-RTDS）分别对无涂层（空载）的样品与覆盖涂层的样品进行测量，获得参考信号 $E_{ref}(t)$ 和涂层样品测量信号 $E_{mea}(t)$ 。

由图 4、图 5 可知，测量信号 $E_{mea}(t)$ 包含多个反射信号与随机噪声 σ_{noise} ，是各反射信号与噪声的加总， $E_{mea}(t) = \sigma_{noise} + E_1(t) + E_2(t) + \sum_i E_i(t)$ ，其中 $i > 2$ 。

S2：将参考信号 $E_{ref}(t)$ 和涂层样品的测量信号 $E_{mea}(t)$ 输入计算机；

通过信号采集模块，将太赫兹时域反射光谱获取的参考信号和测量信号输入计算机。

S3：采用 EMD 算法对输入的参考信号和测量信号进行降噪处理，减少信号中的噪声；EEMD 算法可减少信号中的噪声成分，从而有效减小 S5 最优化寻优过程中的拟合误差。

算法流程图如图 2，具体步骤如下：

S3.1：在测量信号 $E_{mea}(t)$ 和参考信号 $E_{ref}(t)$ 内加入白噪声；

S3.2：分别进行 EMD 分解，得到一系列的本征模态分量 $c_n(t)$ 和余项 $R_n(t)$ ；

S3.3: 重复上述步骤, 一共进行 k 次, 每次加入不同的白噪声, 白噪声服从 $(0, \alpha^2 \varepsilon^2)$ 的正态分布, 其中 α 为附加噪声的标准偏差与输入信号的标准偏差之比, 取 $\alpha = 0.2$, $k = 150$;

S3.4: 将 k 次分解得到的本征模态函数进行整体求均值, 得到测量信号 $E_{mea}(t)$ 和参考信号 $E_{ref}(t)$ 的 EMD 分解结果, 对分解结果进行信号重建, 获得重建后的测量信号和参考信号, 分别记作 $E_{eemd-mea}(t)$ 和 $E_{eemd-ref}(t)$ 。信号的重建结果如图 3 所示。

S4: 设定初始参数, 如涂层样品类型、初始误差等;

涂层样品的层数将影响 S5 中对待求信号 $E_{obj}(t)$ 的建模, 在这一步需要设定样品层数, 初始误差可设定为 500。

S5: 用最优化算法求解拟合信号。

S5.1: 模拟待求信号 $E_{obj}(t)$ 。

$$E_{obj}(t) = E_1(t) + E_2(t) = k_1 E_{eemd-ref}(t + \Delta t_1) + k_2 E_{eemd-ref}(t + \Delta t_2)$$

$$E_1(t) = k_1 E_{eemd-ref}(t + \Delta t_1)$$

$$E_2(t) = k_2 E_{eemd-ref}(t + \Delta t_2)$$

$E_1(t)$ 为由涂层表层反射的反射信号, 为第一级反射信号, $E_2(t)$ 为由基底第一次反射所得的反射信号, 为第二级反射信号, k_1 、 k_2 为根据菲涅尔定律与介质对太赫兹信号吸收性所确定的系数, Δt_1 、 Δt_2 为反射信号 $E_1(t)$ 、 $E_2(t)$ 的飞行时间, 规定 $\Delta t_2 > \Delta t_1$, 由图 4 可知, 各个反射信号在涂层中传播距离的不同, 导致了各信号在时域具有不同的飞行时间, 反射信号的飞行时间与涂层厚度直接相关。

S5.2: 对太赫兹脉冲信号在样品内的多重反射效应进行建模;

如图 5 所示, 由于太赫兹波在涂层中发生了多次反射, 因此在信号接收端将检测到多个具有不同飞行时间的反射信号, $E_2(t)$ 之后的反射信号会影响测量精度, 因此需要尽可能消去后续的反射信号。 $E_1(t)$ 为由涂层表面反射的第一级反射信号, $E_2(t)$ 为由涂层基底反射的第二级反射信号, $E_3(t)$ 、 $E_4(t)$ 为基底第二次、第三次反射的第三级、第四级反射信号, 以此类推至第 i 级反射信号 $E_i(t)$ 。 $E_2(t)$ 之后的反射信号会影响测量精度, 需要尽可能消去

其后的反射信号；当信号发生多重反射时，各个反射信号之间的飞行时间差为定值

$$dt = \Delta t_2 - \Delta t_1,$$

由此可知：

$$E_3(t) = k_3 E_{eemd-ref}(t + \Delta t_2 + dt), \quad E_4(t) = k_4 E_{eemd-ref}(t + \Delta t_2 + 2 \times dt),$$

与 k_1 、 k_2 同理可得系数 k_3 、 k_4 ，第 i 级多重反射信号 E_i 定义为：

$$E_i(t) = k_i E_{eemd-ref}(t + \Delta t_2 + (i - 2) \times dt),$$

其中 $i > 2$ ，对 E_i 求和，得到包含所有多重反射信号的总拟合信号：

$$E_{sim}(t) = E_1(t) + E_2(t) + \sum_i E_i(t) = E_{obj}(t) + \sum_i E_i(t)$$

S5.3：令误差函数 Y 达到最小值，获取最优拟合信号 $E_{best-sim}(t)$ ；

误差函数 Y 定义为：

$$Y = \sum_j (E_{eemd-mea}(t_j) - E_{sim}(t_j))^2$$

将误差函数 Y 作为最优化算法的目标函数，向总拟合信号 $E_{sim}(t)$ 中加入反射信号

$E_i(t) (i > 2)$ ，使 $E_{sim}(t)$ 更接近获取的测量信号 $E_{eemd-mea}(t)$ ，从而降低误差函数 Y 的值，直至 Y 值不再明显减少，获得与测量信号 $E_{eemd-mea}(t)$ 相比误差最小的最优拟合信号

$E_{best-sim}(t)$ 与参数 k_i 、 Δt_1 、 Δt_2 以及引入的反射信号级数 n 。

由图 6 可知，在该实例中，拟合信号 $E_{best-sim}(t)$ 与 $E_{eemd-mea}(t)$ 十分接近，拟合效果良好，各个反射信号的求解结果如图 7 所示， $E_1(t)$ 为涂层表层反射的反射信号， $E_2(t)$ 为涂层基底第一次反射所得的反射信号， $E_3(t)$ 为涂层基底第二次反射所得的反射信号，根据菲涅尔定律， $E_1(t)$ 、 $E_2(t)$ 的符号与入射信号相同， $E_3(t)$ 的符号与入射信号相反。

图 8 示出了随着加入反射信号 $E_i(t)$ 个数的上升，拟合误差的下降曲线。在该实例中，当反射信号增加到三个时，误差不再明显减小，由此可知，对于测量结果具有明显影响的反射信号为 $E_1(t)$ 、 $E_2(t)$ 、 $E_3(t)$ ，多余的反射信号为 $E_3(t)$ ，引入的反射信号级数 $n = 3$ 。

S6: 输出拟合结果, 通过消去拟合信号中多余的反射信号获得仅包含待求涂层厚度信息的待求信号 $E_{obj}(t)$ 。

S6.1: 消除多重反射信号的混叠, 获取待求信号 $E_{obj}(t) = E_1(t) + E_2(t)$;

如图 9 所示, 消去 $E_3(t)$ 后的拟合信号与 $E_{eemd-meas}(t)$ 相比在峰值特征上有较为明显的区别。

S6.2: 计算涂层厚度 d 。

图 10 示出了各个参数的计算结果, 在该实例中:

$$\Delta t_1 = 2274 \times 0.02 = 45.48 ps$$

$$\Delta t_2 = 2295 \times 0.02 = 45.9 ps$$

$$dt = \Delta t_1 - \Delta t_2 = 0.42 ps$$

$$d = \frac{c \times dt}{2n} = \frac{3 \times 10^8 \times 0.42 \times 10^{-12}}{2 \times 5} \times 10^6 um = 12.6 um$$

完成了对厚度小于 20um 涂层的测量工作。

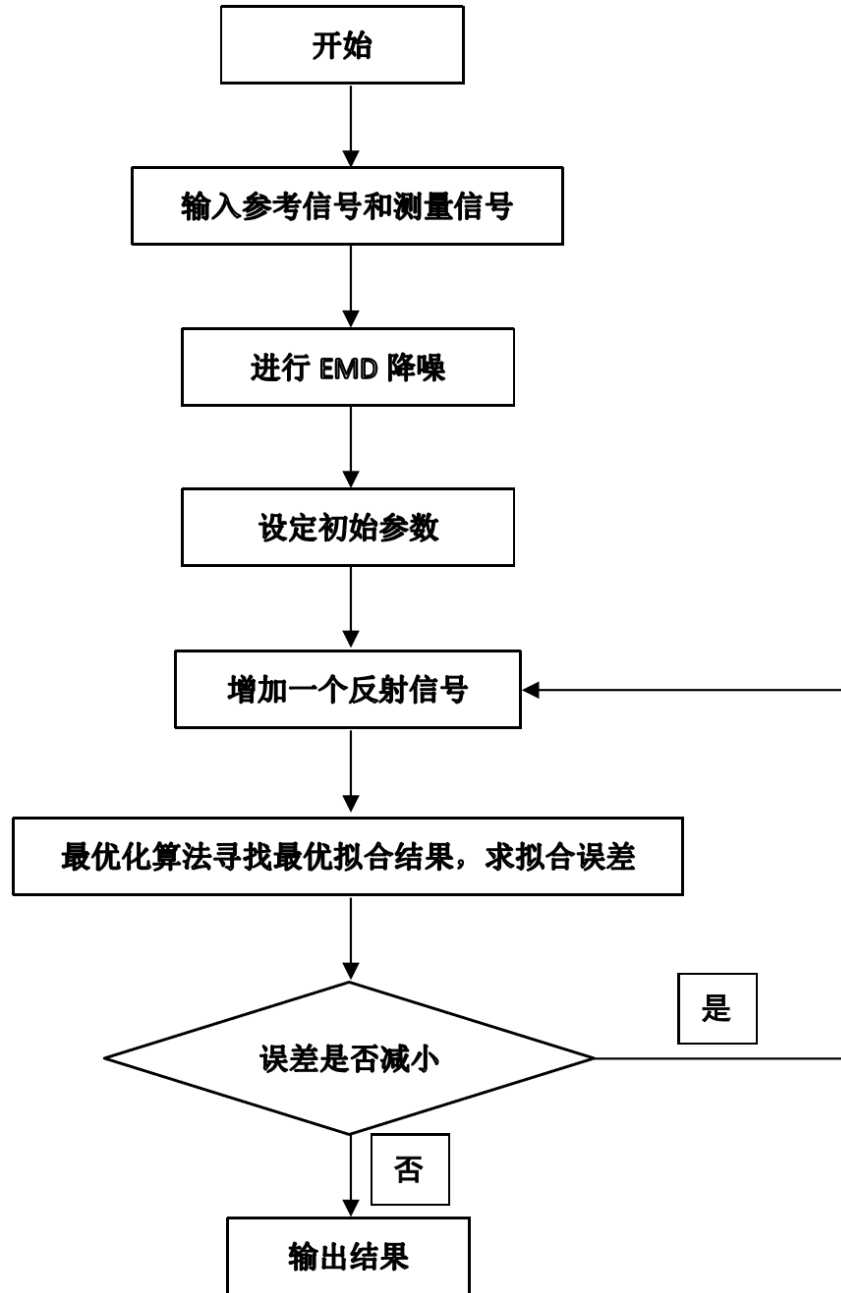


图 1

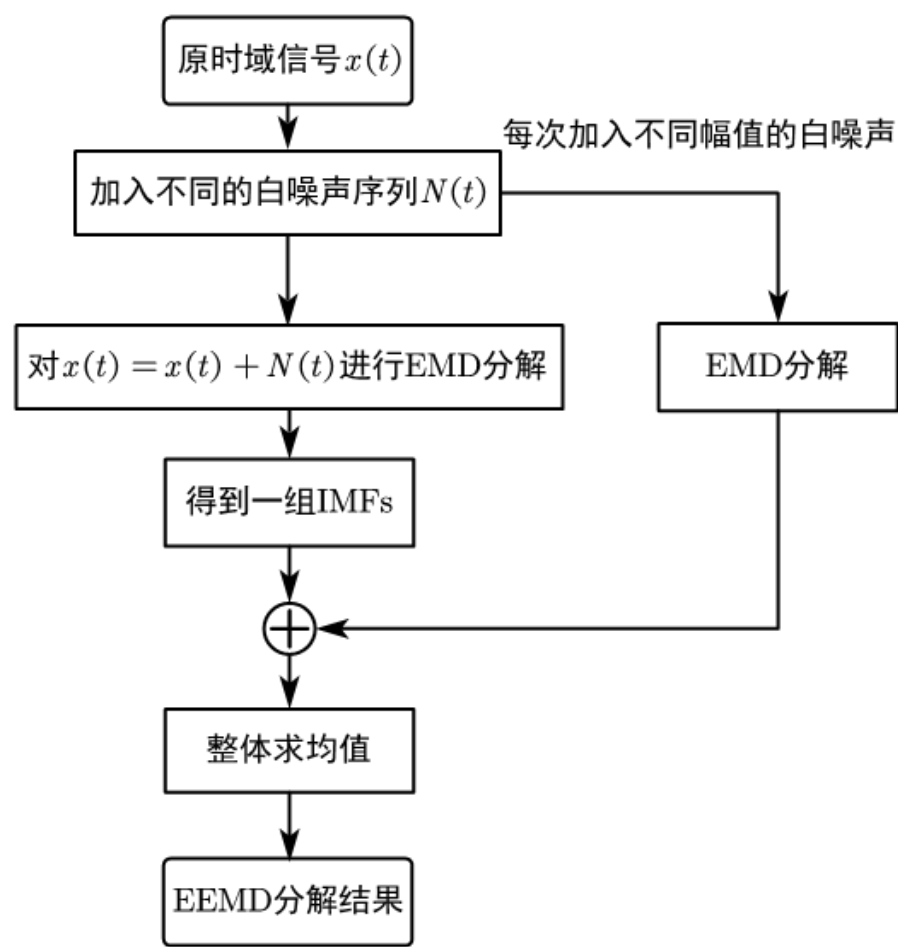


图 2

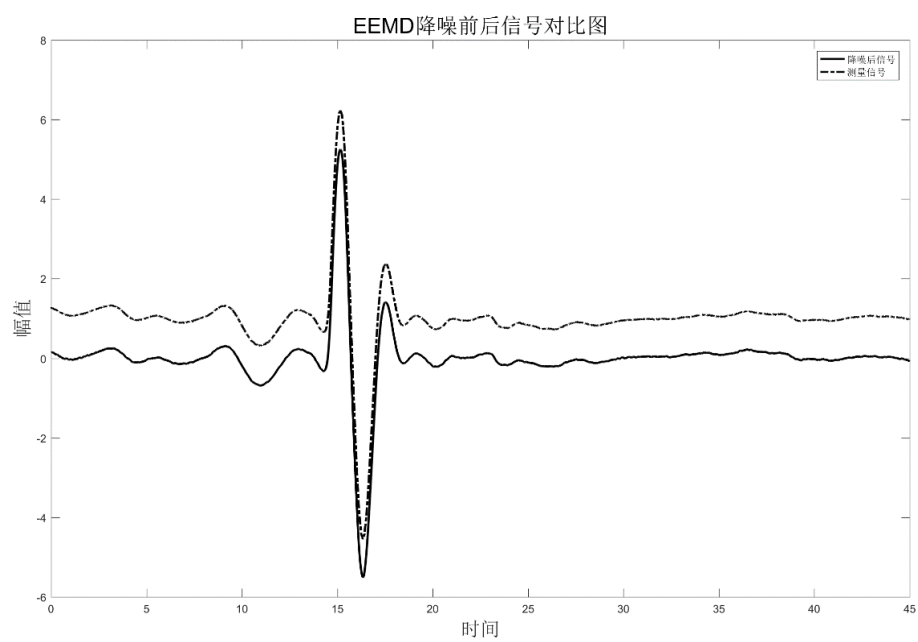


图 3

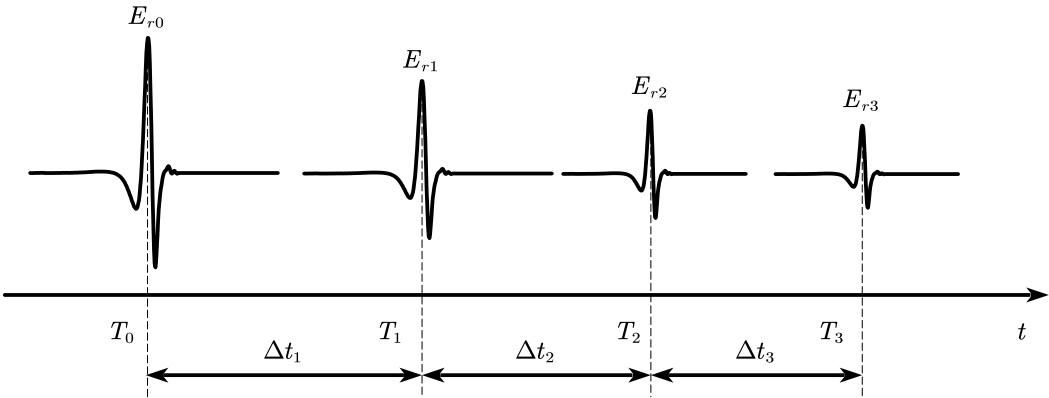


图 4

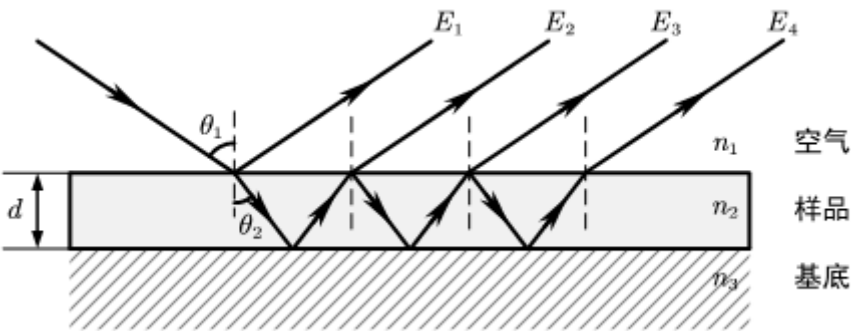


图 5

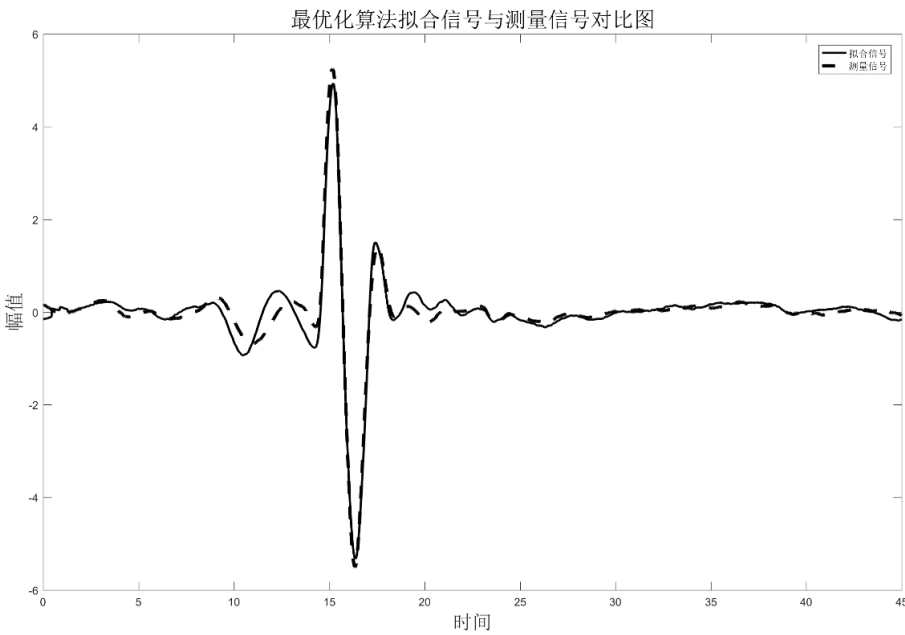


图 6

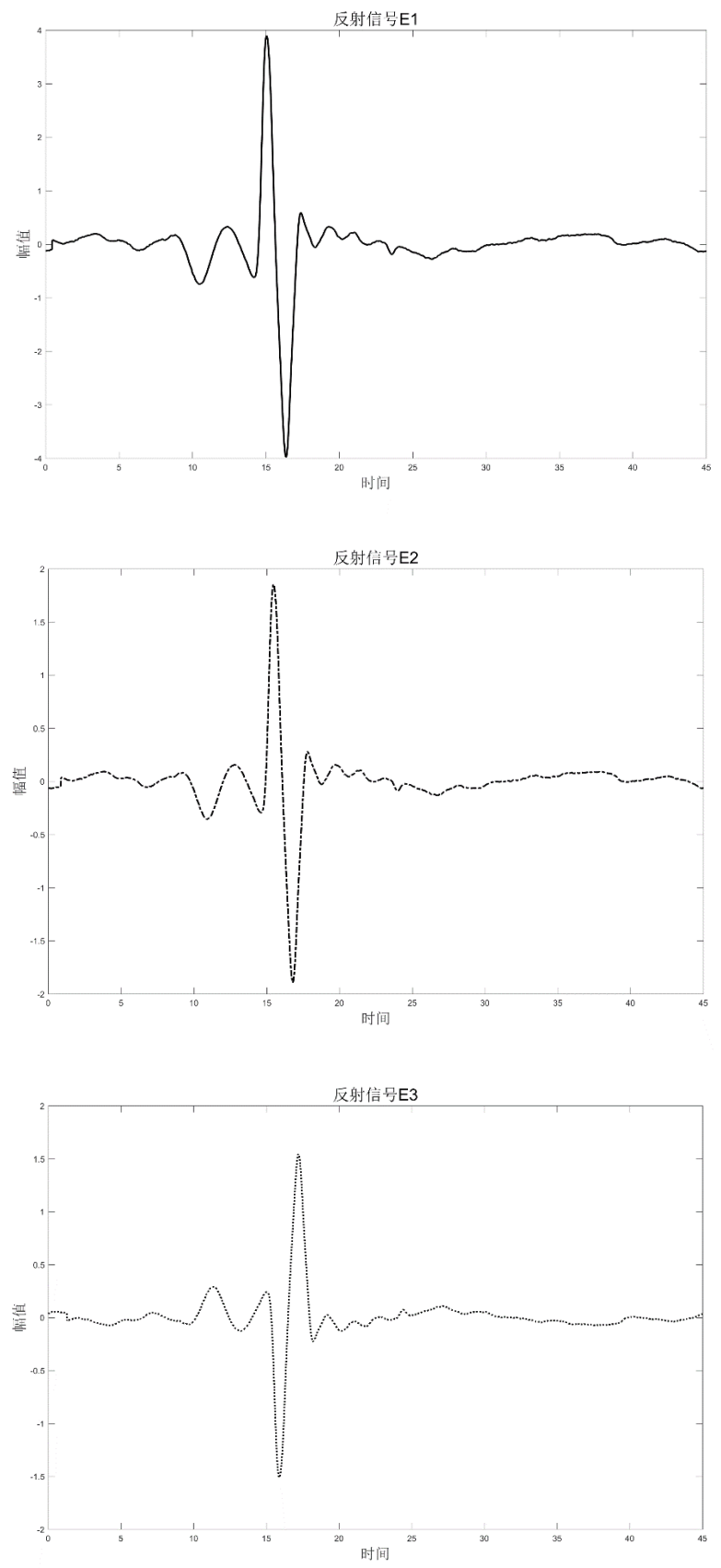


图 7

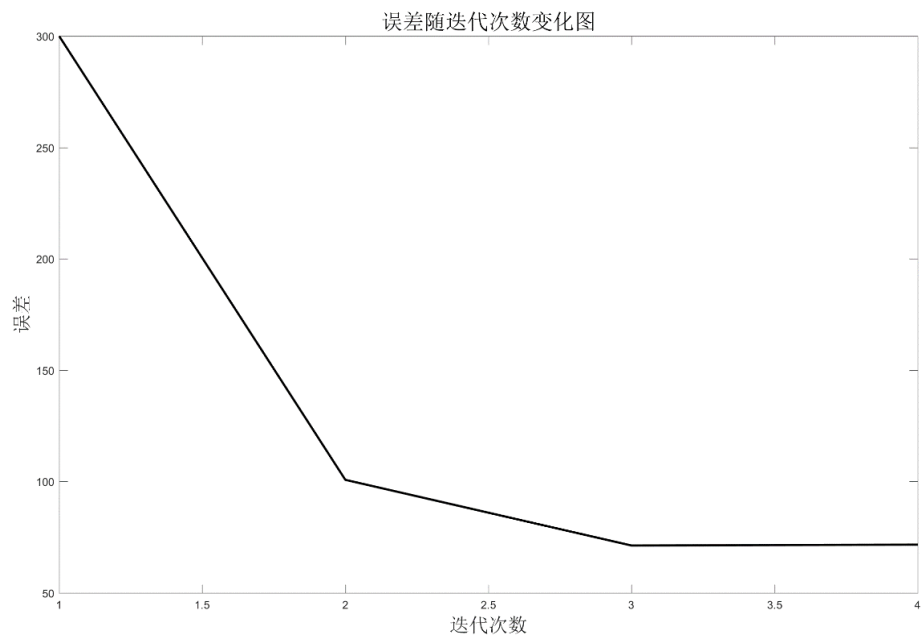


图 8

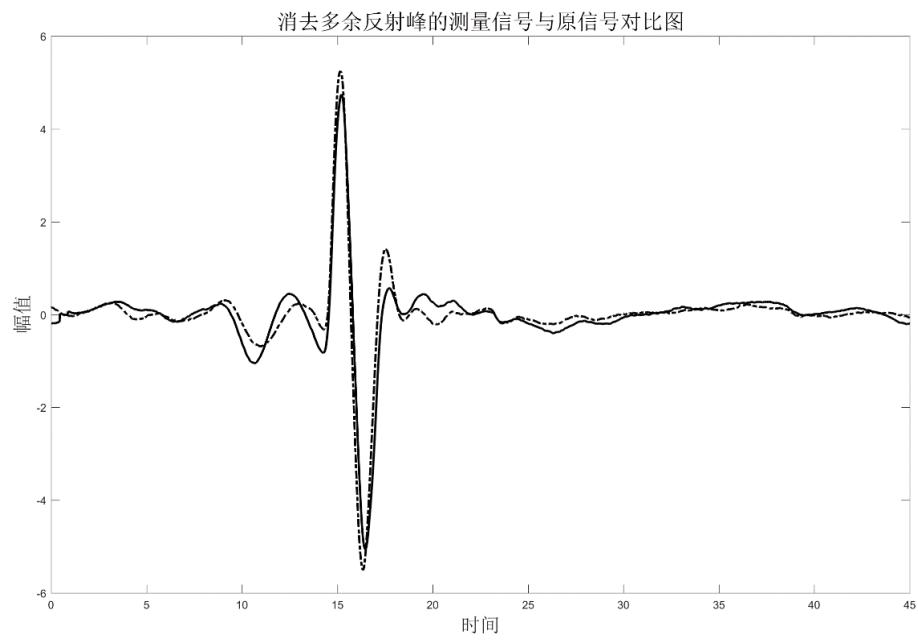


图 9

```
*****best particle number*****  
  
zbestLoop =  
  
[ 2274.0, 2295.0, 0.92222061, 0.43820055, -0.35737108]
```

图 10