

doi: 10.7690/bgzdh.2013.08.019

基于 Hilbert-Huang 变换的雷达发射机故障特征提取

王刘军¹, 刘昌锦²

(1. 陆军军官学院研究生管理大队, 合肥 230031; 2. 陆军军官学院防空兵系, 合肥 230031)

摘要: 为解决目前难以准确提取非线性、非平稳雷达发射机故障信号特征的问题, 提出一种基于 Hilbert-Huang 变换 (HHT) 的雷达发射机故障特征提取方法。介绍 HHT 中瞬时频率和本征模态函数的概念, 给出 HHT 中经验模态分解及其改进算法集合经验模态分解的具体过程。通过对发射机开关电源输入整流滤波电路的仿真, 仿真故障电压信号经过集合经验模态分解得到若干本征模态函数, 对其中一个本征模态函数进行 Hilbert 变换提取瞬时频率。计算结果表明: 基于 HHT 的雷达发射机故障特征提取所得的瞬时频率物理意义明确, 能够充分可靠地检测故障信息、提取故障特征。

关键词: Hilbert-Huang 变换; 雷达发射机; 故障特征提取; 集合经验模态分解

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Fault Feature Extraction for Radar Transmitter Based on Hilbert-Huang Transform

Wang Liujun¹, Liu Changjin²(1. *Administrant Brigade of Postgraduate, Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China;**2. Department of Air Defense Force, Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China)*

Abstract: A method of fault feature extraction for radar transmitter based on Hilbert-Huang Transform (HHT) is put forward for improving the accuracy of fault feature extraction in nonlinear and non-stationary radar transmitter fault signal. Introduce the concepts of instantaneous frequency (IF) and intrinsic mode function (IMF), and provide the specific process of empirical mode decomposition (EMD) and ensemble empirical mode decomposition (EEMD) as an improvement method. Simulate the input rectifier and filter circuit of switching power supply in radar transmitter. Get a number of IMFs from fault voltage signal by EEMD, and the IF from one of the IMFs by Hilbert transform. The calculation result proved that, the IF has definite physical meaning based on the HHT, and HHT can detect fault information and extract fault feature for radar transmitter fully and reliably.

Key words: Hilbert-Huang transform; radar transmitter; fault feature extraction; ensemble empirical mode decomposition

0 引言

雷达发射机的故障主要集中在模拟电路部分。模拟电路属于比较复杂的非线性系统, 其故障信号是非线性、非平稳、非高斯信号, 采用常规方法很难对其建立模型或分析。傅里叶变换适用于对一些不随时间变化的线性平稳信号进行全局分析, 最大的缺点是存在时域和频域局部化矛盾, 若在时域上获取精确的信息, 则不能获取频域上的信息, 反之亦然。小波变换作为对非线性、非平稳信号进行分析的通用方法之一, 很好地解决了时域和频域局部化的矛盾, 但由于小波基函数长度的有限性, 导致小波变换时会出现能量泄露, 影响时频分析的精度。同时, 小波变换中小波基和分解尺度的选择仅与信号的采样频率有关, 与信号本身无关, 不能够反映信号的本质特征, 因此小波分析不具有自适应性。Hilbert-Huang 变换 (HHT) 是 1998 年由 N. E. Huang 及其合作者提出的一种自适应的、能适用于非线性、非平稳信号的新的信号分析方法^[1-2], 克服了傅里叶

变换和小波变换的诸多不足之处, 被美国国家宇航局认为是应用数学领域最重要的发现, 是对以傅里叶变换为基础的线性和稳态谱分析的一个重大突破, 在信号的时频分析中具有划时代的意义^[3]。因而, HHT 近年来在工程应用领域得到了飞速的发展。基于此, 笔者对基于 Hilbert-Huang 变换的雷达发射机故障特征提取进行研究。

1 Hilbert-Huang 变换的原理

HHT 包括“经验模态分解” (empirical mode decomposition, EMD) 和 Hilbert 变换 2 个过程, 而其作为一种新方法的关键就在于经验模态分解。通过 EMD 步骤, 所有复杂的数据集合都能够被分解成为有限个数, 且通常是个数不多的几个“本征模态函数” (intrinsic mode function, IMF)^[4], 本征模态函数表示了信号在每个局部的频率结构或者振荡结构。由于一般信号包含有多种振荡模态, 所以直接对信号进行 Hilbert 变换所得的瞬时频率是没有意义的, 而对 HHT 中的 IMF 进行 Hilbert 变换, 就

收稿日期: 2013-02-06; 修回日期: 2013-03-23

作者简介: 王刘军(1987—), 男, 安徽人, 在读硕士, 从事通信与雷达信号处理理论与技术、智能信息系统研究。

能够对瞬时频率给出有意义的物理解释。

因此, HHT 对信号进行分析包括以下 2 个步骤:

1) 采用 EMD 法对数据作预处理, 对信号进行分解, 得到有限个 IMF 分量之和, 也即对数据进行展开; 2) 对分解得到的每个 IMF 进行 Hilbert 变换, 得到有意义的信号瞬时频率^[5]。

1.1 瞬时频率

给定一连续的时间信号 $x(t)$, 其 Hilbert 变换 $\hat{x}(t)$ 定义为式 (1):

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (1)$$

反变换公式为式 (2):

$$x(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{x}(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2)$$

则定义信号 $x(t)$ 的解析信号为式 (3):

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (3)$$

其中: $a(t)$ 为瞬时振幅; $\theta(t)$ 为瞬时相位^[6]。

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} \quad (4)$$

$$\theta(t) = \arctan \frac{\hat{x}(t)}{x(t)} \quad (5)$$

则瞬时频率为式 (6):

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (6)$$

由瞬时频率的定义可以看出, $f(t)$ 是 t 的单值函数, 在给定的任意时刻, 只对应一个频率值, 且只能表示一种分量, 因此它是单分量的。然而目前却没有单分量信号的严格定义, 所以就不能判断某个函数是否是单分量的。

1.2 本征模态函数 (IMF)

为了使瞬时频率有意义, HHT 给出了其必要条件: 函数必须关于局部零均值对称, 同时过零点个数与极值点个数相同。基于该必要条件可以定义本征模态函数指的是满足下列 2 个条件的函数:

条件一: 在整个函数的时间范围内, 过零点个数和极值点个数必须相等或最多相差一个;

条件二: 在任意时刻, 由局部极大值点和局部极小值点构成的上下包络线均值为零, 即上下包络线关于时间轴局部对称^[7]。

条件一与传统平稳高斯过程的窄带条件类似, 目的是要求 IMF 中不能出现大于零的极小值和小于零的极大值; 条件二是将传统的全局条件改为局部条件, 目的是保证瞬时频率中不能出现由于波形不对称而产生的非希望波动, 通过上下包络线均值为

零使信号强制局部对称。根据定义可以看出, 提取的 IMF 只包含有一种模式的振荡, 而不会产生复杂的骑行波。

1.3 经验模态分解 (EMD)

EMD 基于信号的本身特征, 不需要事先选定基函数, 具有很强的自适应性。通过“筛分”过程可以将任意信号分解成若干 IMF 与一个余项之和, 它是 HHT 的核心。EMD 过程基于如下假设:

1) 信号至少有一个极大值和一个极小值;

2) 时域特性由极值间隔决定;

3) 若数据序列完全缺乏极值但是仅包含拐点, 则可通过一次或多次求导获得极值点, 再通过积分获得分解结果^[8]。

EMD 过程的具体步骤如下:

1) 提取原始信号 $x(t)$ 中的所有局部极大值和极小值点, 利用 3 次样条插值函数模拟信号上下包络线, 上下包络线应包括信号的所有数据点^[9]。

2) 计算上下包络线的平均值 m_1 , 用原始数据 $x(t)$ 减去 m_1 得到 h_1 :

$$h_1 = x(t) - m_1 \quad (7)$$

通常 h_1 不满足 IMF 的条件, 若满足, 则 h_1 即为信号 $x(t)$ 的第一个 IMF 分量。

3) 若 h_1 不满足 IMF 条件, 则将 h_1 作为原始数据重复以上步骤, 直到满足条件, 令

$$c_1 = h_1 \quad (8)$$

则 c_1 即为信号 $x(t)$ 满足 IMF 条件的第一个 IMF 分量。

4) 用原始信号 $x(t)$ 减去 c_1 , 得到余项 r_1 :

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (9)$$

5) 将得到的余项 r_1 作为原始数据重复以上步骤, 重复 k 次后, 当第 k 个余项 r_k 为单调函数无法继续进行 IMF 提取时, 该循环结束。

$$\begin{cases} r_2 = r_1 - c_2 \\ \vdots \\ r_k = r_{k-1} - c_k \end{cases} \quad (10)$$

由以上步骤可得式 (11):

$$x(t) = \sum_{i=1}^k c_i + r_k \quad (11)$$

其中, r_k 代表信号的残余分量, 能在一定程度上反映出信号的平稳趋势。

1.4 集合经验模态分解 (EEMD)

通过大量的数据研究发现, 当数据是非纯白噪声时, EMD 会出现频率混叠现象。但实测数据中都会不同程度地融合信号和噪声, 导致 EMD 过程出

现混频现象难以避免。针对 EMD 的不足, Z. Wu 和 N. E. Huang 提出了一种噪声辅助数据分析方法“集合经验模态分解”(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)法^[10]。

EEMD 的原理是:当附加的白噪声均匀分布在整个时频空间时,该时频空间就由滤波器组分割成的不同尺度成分组成。当信号加上均匀分布的白噪声背景时,不同尺度的信号区域将自动映射到与背景白噪声相关的适当尺度上去。每个独立的测试都可能会产生非常嘈杂的结果,这是因为每个附加噪声的成分都包括了信号和附加的白噪声。既然在每个独立的测试中噪声是不同的,当使用足够测试的全体均值时,噪声将会被消除。全体的均值最后将会被认为是真正的结果,唯一持久稳固的部分是信号本身,所加入的多次测试是为了消除附加的噪声。

在 EMD 的基础上, EEMD 过程的具体步骤为:

- 1) 在实测数据基础上加入白噪声序列;
- 2) 将加入白噪声的序列采用原始 EMD 法分解为 IMF;
- 3) 每次加入不同的白噪声序列,重复以上步骤;
- 4) 把分解得到 IMF 分量的均值作为最终分解结果^[11]。

2 雷达发射机故障特诊提取

故障信号是通过 OrCAD 10.5 软件仿真雷达发射机开关电源中的输入整流滤波电路得到的。开关电源基本电路如图 1 所示。

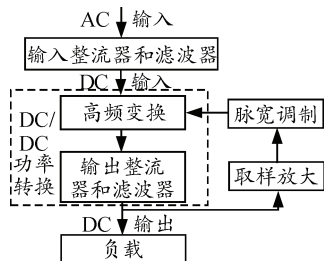


图 1 开关电源基本电路

其中进行仿真的输入整流滤波电路如图 2 所示。故障仿真为整流二极管非正常状态工作,这里引入故障采用的方法是将整流二极管替换为相同类型不同型号参数不同的其他二极管。

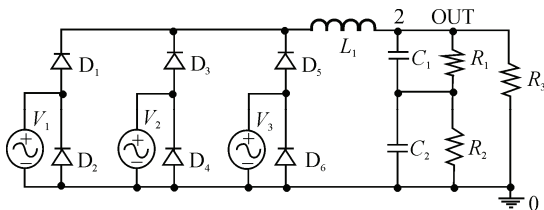


图 2 输入整流滤波电路仿真电路

通过仿真得到输入整流滤波电路输出节点 OUT 处电压值,仿真时间 150 ms,部分仿真数据见

表 1,节点 OUT 处故障电压信号如图 3 所示。

表 1 输出节点 OUT 处部分仿真数据

序号	t/s	V _{OUT} /V
1	0.000 000 000 000e+000	4.649 190 979 004e+002
2	2.500 000 000 000e-005	4.649 190 368 652e+002
3	2.774 810 791 016e-005	4.649 190 368 652e+002
4	3.324 432 373 047e-005	4.649 190 3686 52e+002
5	4.423 675 537 109e-005	4.649 190 063 477e+002
6	6.622 161 865 234e-005	4.649 189 147 949e+002
7	1.101 913 452 148e-004	4.649 184 265 137e+002
8	1.981 307 983 398e-004	4.649 154 357 910e+002
9	3.514 266 967 773e-004	4.648 995 056 152e+002
10	6.105 087 280 273e-004	4.648 148 803 711e+002

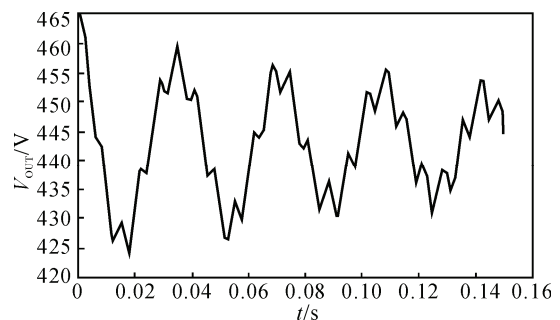


图 3 故障电压信号

图 4 是通过 Matlab 7.0 软件编程,对故障电压信号进行集合经验模态分解(EEMD)后所得的本征模态函数图,从上至下依次为 IMF1~IMF5 分量,最后一项为残余分量。

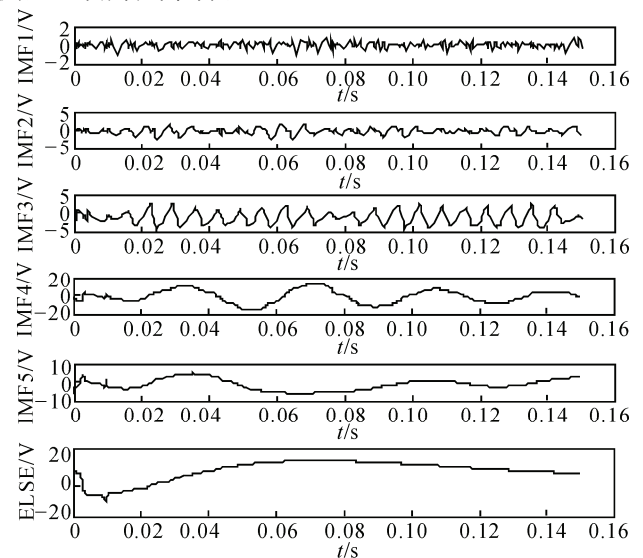


图 4 故障电压信号的本征模态函数

从图 4 可以看出,从 IMF1 到 IMF5 分量越来越平滑,表明 EEMD 除了具备故障特征提取的功能,还具有较好的信噪分离的功能,抗噪性能好。

IMF4 分量集中了故障信号的主要能量,同时也保持了原始信号的主要特征,因此将其作为故障信号提取分量,对 IMF4 进行 Hilbert 变换,可以提取瞬时频率(instantaneous frequency, IF)如图 5 所示。