

航空发动机标准信号的存储与恢复^{*}

谢寿生

樊思齐 段守付

(空军工程学院航空机械工程系, 西安, 710038) (西北工业大学航空发动机系, 西安, 710072)

摘 要: 研究了航空发动机机载系统标准信号的存储和恢复问题, 提出了用信号的功率谱密度代替存储时域信号的思路, 并用信号的一个采样值和其功率谱密度恢复了整个信号。从计算结果看, 该方法可以有效地压缩机载设备的数据存储空间, 并且恢复的信号质量较高。

主题词: 航空发动机, 标准信号⁺, 信息储存, 信号处理

分类号: V249

STORAGE AND RESTORATION OF STANDARD SIGNAL OF AERIAL ENGINE

Xie Shousheng

(Dept. of Aeromechanical Engineering, Air Force Engineering Coll., Xi'an, 710038)

Fan Siqi Duan Shoufu

(Dept. of Aeroengine Engineering, Northwest Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: After researching the standard signal's storage and restoration of aerial engine on board, the clue which uses the signal's power spectrum density for replacing the storage of time domain signals was presented. The method which restores the whole signals with one sample value and its power spectrum density was studied. From the computing result of a type of turbofan at take-off, the data storage space on board was compressed effectively and the quality of the restoration signals was also higher.

Subject terms: Aircraft engine, Standard signal⁺, Information storage, Signal processing

1 引 言

在航空发动机控制和发动机故障诊断中, 需要用到许多标准信号。控制系统根据飞行区域内的标准信号对发动机实施控制, 故障诊断系统根据监测参数与标准信号的偏差大小, 对发动机进行监控和故障诊断。机载设备由于受重量和空间的限制, 存储容量有限。为此, 标准信号的有效存储是当今机载设备能否高效使用所面临的一个问题。

2 标准信号的存储

实验表明, 航空发动机的状态参数和物理参数的响应, 可认为是一个带限的低频信号, 在

* 收稿日期: 1998-04-10, 修回日期: 1998-09-10

频域内表现为有限幅相特性。储存信号的幅相特性的特征点,比储存时域信号能成十倍或百倍地减少存储量。即存储幅频或相频信号可有效地压缩数据,减小内存。图 1 是记录某涡扇发动机起飞时低压转子和高压转子转速信号,数据点数分别为 38 点。而其功率谱密度曲线如图 2 所示,只需分别存储 8 个和 6 个特征点(见图中 $\bullet$ 标记),即可表示整条功率谱密度曲线,显然存储功率谱密度曲线可以有效地压缩数据。一般而言,起飞状态是发动机参数变化较为剧烈的状态,涵盖了其它状态,对起飞状态的研究具有普遍性。

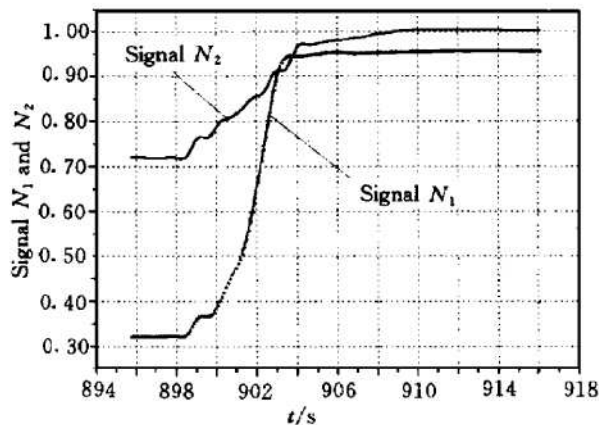


Fig. 1 The record signals
of N_1 and N_2

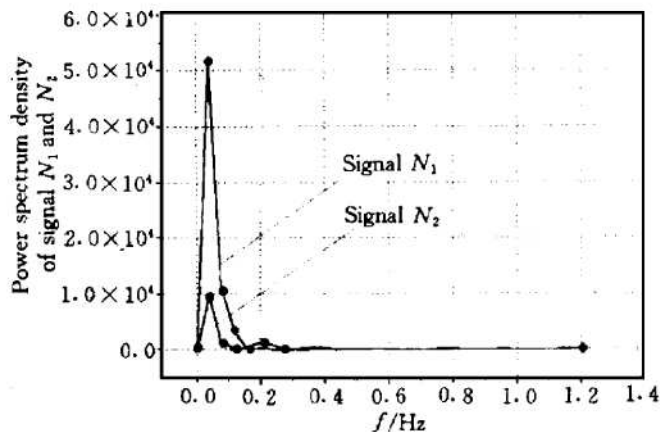


Fig. 2 The power spectrum density
of signals N_1 and N_2

3 标准信号的恢复

信号的压缩与恢复是一对矛盾体,压缩比越大,信号恢复越困难,因此,有效地压缩并不一定能有效地恢复。实际上,信号重构问题可以看为一种“半盲反褶积问题”。若把信号 $z(n)$ 看作是输入 $x(n)$ 通过一个系统 $y(n)$ 后的输出,即 $z(n)$ 等于 $y(n)$ 与 $x(n)$ 的褶积。仅已知 $z(n)$,求 $x(n)$ 或 $y(n)$ 称为盲反褶积,一般情况下没有唯一解,存在无穷多个解。若不仅知道 $z(n)$ 而且还知道部分的 $x(n)$ 与 $y(n)$,则可能得到唯一解。从已知的 $z(n)$ 及 $x(n)$ 、 $y(n)$ 的部分数据,求解 $x(n)$ 与 $y(n)$ 问题可称为“半盲反褶积问题”。这个问题可以看作一种范围更广的信号重构问题。例如,令 $y(n) = x(n)$,则 $z(n)$ 为 $x(n)$ 的自相关序列。这时,已知 $z(n)$ 及部分 $x(n)$ 的采样点,求解 $x(n)$ 问题就等效于已知 $x(n)$ 的幅度谱(其平方的反傅氏变换即为自相关序列)及部分采样点重构原信号问题。所以,半盲反褶积问题是包括内容更广泛的一类信号重构问题。事实上,从 $z(n)$ 求 $x(n)$ 或 $y(n)$ 也被称为反问题。当已知的 $x(n)$ 、 $y(n)$ 的信息量较多时,重构 $x(n)$ 或 $y(n)$ 问题可以归结为求解一个线性方程组问题。若已知的 $x(n)$ 与 $y(n)$ 的信息量较少时,则求解 $x(n)$ 与 $y(n)$ 的问题将变成求解一组非线性方程问题。一般地说,可以用非线性规划的方法来表示半盲反褶积问题,可以包括已知 $x(n)$ 及 $y(n)$ 的各种情况,而且,更容易处理在有噪情况下的半盲反褶积问题。

一个最小相位信号,其幅度谱的对数值与其相位函数互为希尔伯特变换对,即可利用希尔伯特变换,从其幅度谱得到其相位谱。从而仅利用幅度谱(或相位谱)就可以重构信号。但非最小相位信号的幅度与相位谱之间无映射关系,相互独立。对于一个连续信号,若给定一个幅度谱,除了一个最小相位谱和一个最大相位谱外,有无穷多个混合相位谱,反之,若给定一个相位谱(非最小或最大相位),也存在着无限多个具有该相位谱但有不同幅度谱的信号。

故用幅度谱（或相位谱）重构信号时，必须附加约束条件才能使重构信号唯一。

设 F 定义在域 $D \subset R^{N-1}$ 内，取值 R^N 空间的非线性实值函数，即 $F: D \subset R^{N-1} \rightarrow R^N$ ，其形式为： $F(X) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_N(x)]^T$ 。其中 X 为由未知信号样本值 $x_1, x_2, \dots, x_{N-1}$ 构成的向量，即 $X = [x_1, x_2, \dots, x_{N-1}]^T \in R^{N-1}$ 。 $f_i(x)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 为定义在区域 $D \subset R^{N-1}$ 上而取值 R^1 的非线性实值函数，记为 $f_i: D \subset R^{N-1} \rightarrow R^1$ ，函数的形式为：

$$\begin{cases} f_1(x) = x_0^2 + x_1^2 + \dots + x_{N-1}^2 - R_0 \\ f_2(x) = x_0 \cdot x_1 + x_1 \cdot x_2 + \dots + x_{N-2} \cdot x_{N-1} - R_1 \\ \vdots \\ f_{N-1}(x) = x_0 \cdot x_{N-2} + x_1 \cdot x_{N-1} - R_{N-2} \\ f_N(x) = x_0 \cdot x_{N-1} - R_{N-1} \end{cases} \quad (1)$$

其中 R_j ($0 \leq j \leq N-1$) 是序列 $x(n)$ 的自相关函数。 R_j 可由已知的功率谱密度经付氏反变换求得。 x_0 是信号的第一个样本值。 $x_1, x_2, \dots, x_{N-1}$ 为序列 $x(n)$ 的未知样本值。于是，设目标函数 $\Phi(X) = F(X)^T \cdot F(X)$ 为定义在区域 $D \subset R^{N-1}$ 上而取值于 R^1 上而取值于 R^1 的非线性实值函数，记为： $\Phi: D \subset R^{N-1} \rightarrow R^1$ 。将 $F(X)$ 的定义式代入，则有

$$\Phi(X) = f_1^2(x) + f_2^2(x) + \dots + f_N^2(x) \quad (2)$$

如果目标函数是凸集 $D_0 \subset D$ 内的严格凸函数，而且 $x(n) \neq 0$ ，那么函数 $\Phi(X)$ 在 D_0 内有唯一的最小值 $\tilde{X}$ 。对于机载系统记录的标准信号，存储其功率谱密度和一个采样值，用上述方法通过二次型牛顿最优化法计算，可以重构其时域信号。

根据一个采样值和其功率谱密度恢复的信号见图 3，信号的恢复误差情况如图 4 所示。

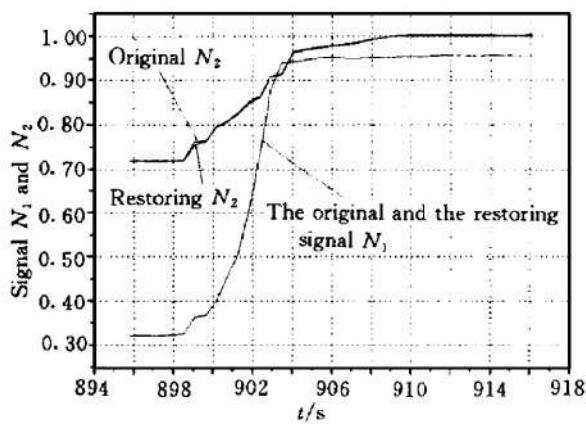


Fig. 3 The restoring and original signals of N_1 and N_2

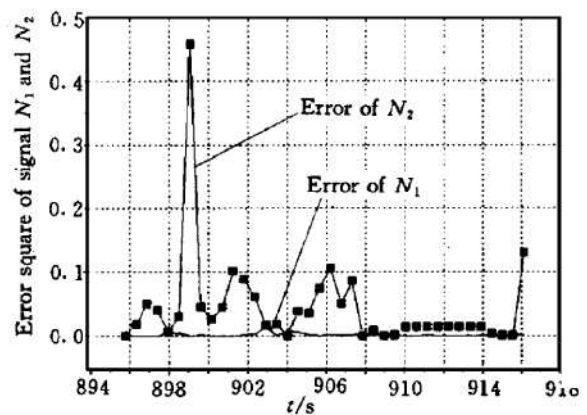


Fig. 4 The error of restoration signals N_1 and N_2

参 考 文 献

- 1 宗孔德. 多抽样率信号处理. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- 2 李衍达. 信号重构理论及其应用, 北京: 清华大学出版社, 1991.
- 3 Morris C E. Fast reconstruction of linearly distorted signals. IEEE Transactions on ASSP, 1998, 36 (7)
- 4 Singh. An iterative restoration technique. Signal processing, 1986, 11