

自适应滤波方法 (二)

主讲人 宋辉

清华大学电子工程系 博士
滴滴AI Labs 语音技术部



 4.1 Recursive Least Square(RLS)算法

 4.2 Affine Projection(AP)算法

 4.3 实战



课程回顾

从一个N阶线性系统出发... ..

目标：设计一个N阶滤波器，它的参数为 $\mathbf{w}(n)$ ，则滤波器输出为：

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n)x(n-i) = \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n) = \mathbf{x}^T(n)\mathbf{w}(n) \quad (3.1)$$

上式中：

$$\mathbf{x}(n) = [x(n), \quad x(n-1), \quad \dots \quad x(n-N+1)]^T \quad (3.2)$$

$$\mathbf{w}(n) = [w_0(n), \quad w_1(n), \quad \dots \quad w_{N-1}(n)]^T \quad (3.3)$$

期望输出为 $d(n)$ ，定义误差信号：

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n) \quad (3.4)$$



课程回顾

根据最小均方误差(MMSE)准则, 最小化目标函数: $J(\mathbf{w})$

$$J(\mathbf{w}) = E \left\{ |e(n)|^2 \right\} = E \left\{ |d(n) - \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n)|^2 \right\} \quad (3.5)$$

为了最小化均方误差函数, 需计算 $J(\mathbf{w})$ 对 \mathbf{w} 的导数, 令导数为零:

$$E \left\{ \mathbf{x}(n)\mathbf{x}^T(n) \right\} \mathbf{w}(n) - E \left\{ \mathbf{x}(n)d(n) \right\} = \mathbf{R}\mathbf{w} - \mathbf{r} = \mathbf{0} \quad (3.6)$$

可得到:

$$\boxed{\mathbf{w}_{opt} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}} \quad (3.7)$$

(3.6)定义的滤波器称为Wiener滤波器。Wiener滤波器是均方误差最小意义上的统计最优滤波器。



4.1 Recursive Least Square(RLS)算法

MMSE是一个均匀加权的最优化问题，也就是说，每一时刻的误差信号对目标函数的贡献权重是相同的。

采用指数加权的方式，重新定义目标函数：

$$J_n(\mathbf{w}) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} |e(i)|^2 = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} |d(i) - \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(i)|^2 \quad (4.1)$$

式中, $0 < \lambda \leq 1$ 称为遗忘因子。

遗忘因子的作用是对离 n 时刻越近的误差加比较大的权重，而对离 n 时刻越远的误差加比较小的权重，也就是说对各个时刻的误差具有一定的遗忘作用。

如果 $\lambda = 1$ ，表示无任何遗忘功能，或具有无穷记忆功能，此时RLS退化为LS方法。

如果 $\lambda \rightarrow 0$ ，表示只有当前时刻的误差起作用，而过去时刻的误差完全被遗忘。



4.1 RLS算法

$$J_n(\mathbf{w}) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} |e(i)|^2 = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} \|d(i) - \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(i)\|^2 \quad (4.1)$$

特别注意，对于误差的定义： $e(i) = d(i) - \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(i)$ 用的是 $\mathbf{w}^T(n)$ ，而不是 $\mathbf{w}^T(i)$ 。

原因：在自适应更新过程中，滤波器总是变得越来越好，这意味着对于任何的 $i < n$ ， $|d(i) - \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(i)|$ 总是比 $|d(i) - \mathbf{w}^T(i)\mathbf{x}(i)|$ 小。因此，由前者构成的目标函数(4.1)总是比由后者构成的目标函数更小，是一种更为合理的选择。

由于计算 i 时刻的误差 $e(i)$ ，用到了 n 时刻的滤波器系数，因此(4.1)式也被称为后验估计误差。



4.1 RLS算法



最小化目标函数 $J_n(\mathbf{w})$

令 $J_n(\mathbf{w})$ 的梯度等于0, 得出:

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{r}(n) \quad (4.2)$$

其中:

$$\mathbf{R}(n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} \mathbf{x}(i) \mathbf{x}^T(i) \quad (4.3)$$

$$\mathbf{r}(n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} \mathbf{x}(i) d(i) \quad (4.4)$$

可以看到, 最小化指数加权的目標函数, 它的解仍然是维纳解。



4.1 RLS算法



求解滤波器参数 $\mathbf{w}(n)$

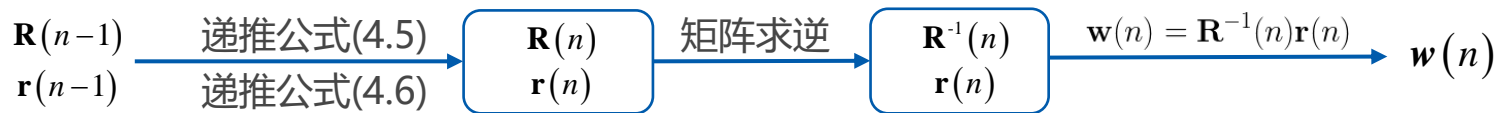
$$\mathbf{R}(n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} \mathbf{x}(i) \mathbf{x}^T(i) \quad (4.3)$$

$$\mathbf{r}(n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} \mathbf{x}(i) d(i) \quad (4.4)$$

根据 $\mathbf{R}(n)$ 和 $\mathbf{r}(n)$ 的等式，得其时间递推公式：

$$\mathbf{R}(n) = \lambda \mathbf{R}(n-1) + \mathbf{x}(n) \mathbf{x}^T(n) \quad (4.5)$$

$$\mathbf{r}(n) = \lambda \mathbf{r}(n-1) + \mathbf{x}(n) d(n) \quad (4.6)$$



弊端：需要计算每个 $\mathbf{R}(n)$ 的逆矩阵，很不划算。更优的方法？



4.1 RLS算法



探索 $\mathbf{P}(n) = \mathbf{R}^{-1}(n)$ 的时间递推公式

$$\mathbf{P}(n) = \mathbf{R}^{-1}(n) = \left(\lambda \mathbf{R}(n-1) + \mathbf{x}(n) \mathbf{x}^T(n) \right)^{-1}$$

根据矩阵求逆引理：

$$(A + BCD)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B(C^{-1} + DA^{-1}B)^{-1}DA^{-1}$$

$$\text{令： } A = \mathbf{R}(n-1) \quad B = \mathbf{x}(n) \quad C = \frac{1}{\lambda} \quad D = \mathbf{x}^T(n)$$

可以得到：

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(n) &= \frac{1}{\lambda} \left[\mathbf{P}(n-1) - \frac{\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{P}(n-1)}{\lambda + \mathbf{x}^T(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)} \right] \\ &= \frac{1}{\lambda} [\mathbf{P}(n-1) - \mathbf{k}(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{P}(n-1)] \end{aligned} \quad (4.7)$$

其中，增益向量：

$$\mathbf{k}(n) = \frac{\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)}{\lambda + \mathbf{x}^T(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)} \quad (4.8)$$



4.1 RLS算法



探索 $\mathbf{w}(n)$ 的时间递推公式

$$\begin{aligned}\mathbf{P}(n)\mathbf{x}(n) &= \frac{1}{\lambda} [\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n) - \mathbf{k}(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)] \\ &= \frac{1}{\lambda} \{ [\lambda + \mathbf{x}^T(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)] \mathbf{k}(n) - \mathbf{k}(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n) \} \\ &= \mathbf{k}(n)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{w}(n) &= \mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{r}(n) = \mathbf{P}(n)\mathbf{r}(n) \\ &= \frac{1}{\lambda} [\mathbf{P}(n-1) - \mathbf{k}(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{P}(n-1)] [\lambda\mathbf{r}(n-1) + \mathbf{x}(n)d(n)] \\ &= \mathbf{P}(n-1)\mathbf{r}(n-1) - \mathbf{k}(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{r}(n-1) \\ &\quad + \frac{1}{\lambda}d(n) [\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n) - \mathbf{k}(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)] \\ &= \mathbf{w}(n-1) + d(n)\mathbf{k}(n) - \mathbf{k}(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{w}(n-1) \\ &= \mathbf{w}(n-1) + \mathbf{k}(n) [d(n) - \mathbf{x}^T(n)\mathbf{w}(n-1)] \\ &= \mathbf{w}(n-1) + \mathbf{k}(n)\varepsilon(n)\end{aligned}\tag{4.9}$$

这就是标准RLS算法的更新公式，这里的 $\varepsilon(n)$ 为先验估计误差。



4.1 RLS算法

标准RLS算法的执行流程：

1) 初始化： $\mathbf{w}(0) = \mathbf{0}$, $\mathbf{P}(0) = \delta^{-1}\mathbf{I}$, δ 是一个很小的正数。

2) 对每一个时刻 n , 重复如下计算：

先验误差： $\varepsilon(n) = d(n) - \mathbf{w}^T(n-1)\mathbf{x}(n)$

增益向量： $\mathbf{k}(n) = \frac{\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)}{\lambda + \mathbf{x}^T(n)\mathbf{P}(n-1)\mathbf{x}(n)}$

逆矩阵更新： $\mathbf{P}(n) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{P}(n-1) - \mathbf{k}(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{P}(n-1)]$

滤波器更新： $\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \mathbf{k}(n)\varepsilon(n)$



4.1 RLS算法



RLS v.s. LMS

一个广泛的共识是，RLS算法的收敛速度和跟踪性能都优于LMS算法，所付出的代价是需要更复杂的计算。

算法	误差计算	收敛速度	跟踪性能	计算代价
LMS	后验误差	慢	慢	小
RLS	先验误差	快	快	大

由于RLS使用了自相关矩阵的逆矩阵的递推，所以，一旦输入信号的自相关矩阵接近奇异时，RLS的收敛速度和跟踪性能会严重恶化。



4.2 AP算法

仿射投影算法 (Affine projection algorithm) 是运算量介于LMS和RLS之间的一种自适应算法。

仍然考虑一个 N 阶系统 $\mathbf{w}(n)$:

注意此处考虑更一般的模型，
输入和权重可以是复数。

$$y(n) = \mathbf{w}^H(n)\mathbf{x}(n) = \mathbf{x}^T(n)\mathbf{w}^*(n) \quad (4.11)$$

这一次，我们把 L 个输出信号组成一个向量：

$$\mathbf{y}(n) = [y(n), y(n-1), \dots, y(n-L+1)]^T \quad (4.12)$$

与之对应的，输入信号由向量变成矩阵：

$$\mathbf{X}(n) = [\mathbf{x}(n), \mathbf{x}(n-1), \dots, \mathbf{x}(n-L+1)] \quad (4.13)$$



4.2 AP算法

此时，滤波器的输出变成了如下形式：

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{X}^T(n) \mathbf{w}^*(n) \quad (4.14)$$

令滤波器的自适应更新公式为：

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \mu \Delta \mathbf{w}_n \quad (4.15)$$

将(4.15)代入(4.14)，得：

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{X}^T(n) \mathbf{w}^*(n-1) + \mu \mathbf{X}^T(n) \Delta \mathbf{w}_n^* \quad (4.16)$$

令滤波器的实际输出作为期望输出 $d(n)$ ，则先验误差向量：

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{y}(n) - \mathbf{X}^T(n) \mathbf{w}^*(n-1) \quad (4.17)$$



4.2 AP算法

为了简化, 我们令 $\mu = 1$, 则:

$$\mathbf{X}^T(n)\Delta\mathbf{w}_n^* = \mathbf{e}(n) \quad (4.18)$$

$$\mathbf{X}^H(n)\Delta\mathbf{w}_n = \mathbf{e}^*(n) \quad (4.19)$$

发现了什么?

滤波器系数的更新量 $\Delta\mathbf{w}_n^*$ ($\Delta\mathbf{w}_n$), 是由 L 个线性方程组成的线性方程组决定的。



线性方程组相关内容补充

对于线性方程组： $\mathbf{A}_{m \times n} \mathbf{x}_{n \times 1} = \mathbf{b}_{m \times 1}$

考虑（行/列）满秩的情况，分下面三种情况：

（一）如果 $m = n$ ，则：

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b}$$

唯一解、精确解

（二）如果 $m < n$ ，即方程的个数小于未知数的个数，此时方程组有无穷多个解。为了得到唯一解，必须增加约束条件，要求 \mathbf{x} 的范数最小，这样得到的解称为最小范数解。

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^H (\mathbf{A} \mathbf{A}^H)^{-1} \mathbf{b}$$

最小范数解

（三）如果 $m > n$ ，即方程的个数大于未知数的个数，此时方程组不存在精确解，只存在近似解。我们自然希望找到一个使方程组两边的误差平方和为最小的解，即最小二乘解。

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{b}$$

最小二乘解



4.2 AP算法

利用线性方程组的结论，重新观察(4.19)式：

$$\mathbf{X}^H(n)\Delta\mathbf{w}_n = \mathbf{e}^*(n) \quad (4.19)$$

分为两种情况讨论：

情况1： $1 \leq L < N$ ，方程组为欠定方程，具有唯一的最小范数解：

$$\Delta\mathbf{w}_n = \mathbf{X}(n) \left(\mathbf{X}^H(n)\mathbf{X}(n) \right)^{-1} \mathbf{e}^*(n) \quad (4.20)$$

此时，自适应算法(4.15)变为：

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \mu \mathbf{X}(n) \left(\mathbf{X}^H(n)\mathbf{X}(n) \right)^{-1} \mathbf{e}^*(n) \quad (4.21)$$

如果 $L = 1$ ，则退化为NLMS算法：

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \mu e^*(n) \frac{\mathbf{x}(n)}{\mathbf{x}^H(n)\mathbf{x}(n)} \quad (4.22)$$

实际中， L 取2、3就足够了。



4.2 AP算法

利用线性方程组的结论，重新观察(4.19)式：

$$\mathbf{X}^H(n)\Delta\mathbf{w}_n = \mathbf{e}^*(n) \quad (4.19)$$

情况2： $L \geq N$ ，方程组为超定方程，其唯一解为最小二乘解：

$$\Delta\mathbf{w}_n = (\mathbf{X}(n)\mathbf{X}^H(n))^{-1} \mathbf{X}(n)\mathbf{e}^*(n) \quad (4.23)$$

此时，自适应算法(4.15)变为：

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \mu (\mathbf{X}(n)\mathbf{X}^H(n))^{-1} \mathbf{X}(n)\mathbf{e}^*(n) \quad (4.24)$$

如果我们令： $\mu = 1$ ， $\mathbf{R}(n) = \frac{1}{L}\mathbf{X}(n)\mathbf{X}^H(n)$ ， $\mathbf{r}(n) = \frac{1}{L}\mathbf{X}(n)\mathbf{y}^*(n)$ ，并结合等式(4.17)，可得：

$$\begin{aligned} \mathbf{w}(n) &= \mathbf{w}(n-1) + (\mathbf{X}(n)\mathbf{X}^H(n))^{-1} \mathbf{X}(n) (\mathbf{y}^*(n) - \mathbf{X}^H(n)\mathbf{w}(n-1)) \\ &= \mathbf{w}(n-1) + \mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{r}(n) - \mathbf{R}^{-1}(n)\mathbf{R}(n)\mathbf{w}(n-1) \end{aligned} \quad (4.25)$$

等价于RLS算法。



4.2 AP算法

仿射投影算法提供了一套自适应滤波分析的统一框架，这套框架将LMS、AP、RLS三种算法串联在一起。

AP算法是计算复杂度和性能介于LMS和RLS之间的自适应算法，在AEC、multi-channel等场景中都有应用。

大家可以根据实际项目中对计算复杂度、收敛速度的要求，选择合适的自适应算法，解决自身场景的问题。

本节介绍的RLS、AP算法都有各自的快速算法，可以提高收敛速度或减少计算量，大家如果感兴趣可以自行查阅相关文献。



自适应滤波方法总结

维纳滤波

平稳环境、最小均方意义下的统计最优滤波器

最小均方族 自适应滤波器

LMS滤波器

分块LMS滤波器

归一化LMS滤波器

频域自适应滤波器

子带自适应滤波器

仿射投影 自适应滤波器

收敛速度和计算复杂度介于LMS和RLS之间。

递归最小二乘 自适应滤波器

RLS自适应滤波器提供更快的收敛速度和跟踪性能。



本章回顾



4.1 Recursive Least Square(RLS)算法



4.2 Affine Projection(AP)算法



4.3 实战



LMS和RLS算法的实现

请大家编程实现基本LMS算法和RLS算法：

```
int conv(short* inputdata, long inputdata_length, double* rir, long rir_length, short* outputdata);
```

输入：input：一个新的输入sample： $x(n)$
adapt_filter：自适应滤波器buffer
filter_length：自适应滤波器的阶数

输出：err：滤波后的误差信号 $e(n)$
方法：分别用基本LMS算法、RLS算法实现自适应滤波过程
语言：C/C++

函数的调用，外层的语音数据和冲激响应函数，我们都已经准备好，请大家独立完成adapt_filt.cpp中的adapt_filtering这个核心函数。

为了简化问题，我们采用白噪声作为输入信号（audio.raw），并且令期望输出信号 $d(n)$ 等于输入信号。很显然，最优滤波器就是一个简单的delta函数，大家可以根据滤波器收敛后的系数判断算法实现的正确性。

感谢聆听！

Thanks for Listening

