

第 1 章 可见光多波段 OFDM 系统的信道估计

1.1 引言

所谓信道估计，就是在接收端估计出信道状态信息（Channel State Information, CSI），为下一步地解调做准备，也是自适应传输技术的基础。无线通信一个重要的特征就是发射端到接收端之间的路径比较复杂，不像有线通信那样是固定且可预知的，所以信道估计技术在无线通信领域格外重要，特别是在 OFDM 等需要相干检测的系统中。本章将着重介绍信道估计技术，首先介绍传统射频通信中 OFDM 系统的信道估计方法，然后具体到可见光通信系统中的信道估计问题，再将结合实际系统设计，讨论信道的非线性问题，最后将研究多色可见光通信系统中各波段之间串扰的估计。

1.2 OFDM 信道估计常用方法

信道估计总体可以分为两大类，盲信道估计和基于导频的信道估计。盲信道不需要额外的导频或者训练序列，因此频率利用率高；但是它的缺点是计算量大、算法复杂，而且精度低、收敛速度缓慢，难以用于移动通信环境^[1]。基于导频的信道估计原理是在发射端插入专门用于信道估计的导频或者训练序列，并且这些序列对于接收端也是已知的，接收端根据接收到的经过了信道后的导频序列与原导频序列之间的关系，估计出信道冲击响应（Channel Impulse Response, CIR）。这类信道估计方法因为要插入导频序列会稍微降低整个系统的传输速率，但是其估计实现复杂度低、估计精度高，在实际工程中大都采用这种方法。本节也主要讨论基于导频的信道估计算法。对于基于导频的信道估计而言，研究人员对其导频放置方式也进行了深入的研究，如图 1.1 所示，常见的有块状和梳状两种放置方式。

块状导频放置方式见图 1.1a，它的导频序列连续放置在一个 OFDM 符号上，但是在时间上不是连续的，也就是说要隔若干个 OFDM 符号才放置一个导频序列。在工程实现中，更常见的一种情况是导频序列即用于信道估计，又用于同步，这样一般是一帧放置一个导频符号。块状导频放置方式的优点是结构简单，计算复杂度低，但是因为要隔一段时间才估计一次信道，所以块状导频放置方式一般用于信道时变比较缓慢的信道。

梳状导频放置方式如图 1.1b 所示，在每个 OFDM 符号上，它只选择在特定的子载波上放置导频序列，而其他子载波上放置数据符号，并且每个 OFDM 符号的结构都是如此。它的工作原理是先估计出放置了导频的子载波处的信道响应，然后根据这些信道响应通过插值的方式得到那些放置了数据符号的子载波处的信道响应。它的优点是每个符

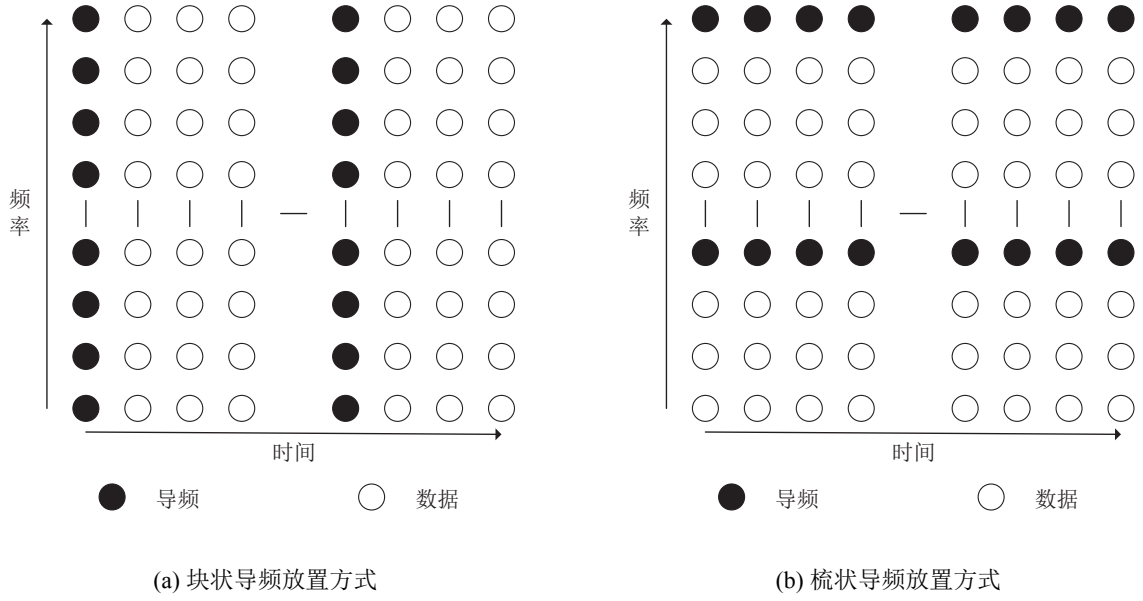


Figure 1.1 导频放置方式

号都会估计信道，能够应对快速时变的信道，但是它要使用插值计算，所以复杂度比较高，并且估计准确度也较低。

从接收端数字信号处理的角度来讲，可以分为基于导频的信道估计可以分为最小二乘法准则 (Least Square, LS) 和最小均方误差估计准则 (minimum mean square error, MMSE) 两种，为了说明这两种准则的工作原理，我们先建立 OFDM 数字处理模型，并且假设循环前缀的长度大于最大多径时延，则根据我们在第二章中线性信道模型可得：

$$\mathbf{y} = \mathbf{h} \otimes \mathbf{x} + \mathbf{m} \quad (1.1)$$

其中 \otimes 代表循环卷积， \mathbf{x} 为发射信号向量， \mathbf{y} 为除去循环前缀之后的接收信号向量， \mathbf{m} 为噪声信号向量。

对式 1.1 两边同时做离散时间傅里叶变换，得到：

$$\begin{aligned} DFT(\mathbf{y}) &= DFT(\mathbf{h} \otimes \mathbf{x}) + DFT(\mathbf{z}) \\ &= DFT(\mathbf{h}) \times DFT(\mathbf{x}) + DFT(\mathbf{z}) \end{aligned} \quad (1.2)$$

我们知道对向量做傅里叶变换相当于在对向量左成乘上傅里叶变换矩阵，所以我们得到：

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{F}\mathbf{h} + \mathbf{M} = \mathbf{X}\mathbf{H} + \mathbf{Z} \quad (1.3)$$

其中：

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X} &= \text{diag}(DFT(\mathbf{x})) = \text{diag}(\mathbf{F}\mathbf{x}) = \text{diag}([X(0), X(1), \dots, X(N-1)]^T) \\
 \mathbf{Y} &= DFT(\mathbf{y}) = \mathbf{F}\mathbf{y} = [Y(0), Y(1), \dots, Y(N-1)]^T \\
 \mathbf{Z} &= DFT(\mathbf{z}) = \mathbf{F}\mathbf{y} = [Z(0), Z(1), \dots, Z(N-1)]^T \\
 \mathbf{H} &= DFT(\mathbf{h}) = \mathbf{F}\mathbf{h} = [H(0), H(1), \dots, H(N-1)]^T \\
 \mathbf{F} &= \begin{bmatrix} W_N^{00} & \dots & W_N^{0(N-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_N^{(N-1)0} & \dots & W_N^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \quad W_N^{nk} = \frac{1}{N} e^{-j2\pi(n/N)k}
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

\mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 、 \mathbf{H} 分别表示频域发射信号，频域接收信号和信道频域响应值， \mathbf{Z} 为频域高斯噪声。由此我们得到了衰落信道下的 OFDM 系统模型，下面我们来探讨常用的估计方法。信道估计准则有两种，分别是最小二乘法准则 (Least Square, LS) 和最小均方误差估计准则 (minimum mean square error, MMSE)。基于最小二乘准则的的估计算法目标是使得目标函数 $\mathbf{J}(\mathbf{H})$ 最小：

$$\arg \min_H \mathbf{J}(\mathbf{H}) = \arg \min_H \{|\mathbf{Y} - \mathbf{X}\mathbf{H}|^2\} \tag{1.5}$$

由此求得的最小二乘解也就是信道 LS 估计值 \mathbf{H}_{LS} ：

$$\hat{\mathbf{H}}_{LS} = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{Y} \tag{1.6}$$

线性最小均方误差估计算法 (Linear minimum mean square error, LMMSE) 则是基于统计估计理论的贝叶斯估计方法，LMMSE 估计是对 LS 估计的最佳线性滤波^[7]，此时将信道频域响应 \mathbf{H} 看成一个随机向量，信道估计问题可以看成对 LS 估计结果 \mathbf{H}_{LS} 的线性滤波。假设频域 LMMSE 估计器的形式为：

$$\hat{\mathbf{H}}_{LMMSE} = \mathbf{Q}\hat{\mathbf{H}}_{LS} \tag{1.7}$$

其中， \mathbf{Q} 是滤波矩阵，LMMSE 的目标是使得估计得到的信道系数与实际的信道系数之间的均方误差 (Mean Square Error, MSE) $\Lambda(\mathbf{Q})$ 最小：

$$\arg \min_Q \Lambda(\mathbf{Q}) = \arg \min_Q \{|\mathbf{H}_R - \mathbf{H}_{LMMSE}|^2\} \tag{1.8}$$

其中， \mathbf{H}_R 是真实信道，由此得到的 LMMSE 信道估计器为：

$$\mathbf{H}_{LMMSE} = \mathbf{F}\mathbf{R}_{hY}\mathbf{R}_{YY}^{-1}\mathbf{Y} \tag{1.9}$$

其中， \mathbf{R}_{hY} 是信道冲激响应向量 \mathbf{h} 和接收端信号向量 \mathbf{Y} 的互协方差矩阵， \mathbf{R}_{YY} 是接收端信号向量 \mathbf{Y} 的自协方差矩阵， \mathbf{R}_{hh} 是 \mathbf{h} 的自协方差矩阵， σ^2 是噪声方差。其中 \mathbf{R}_{hY} 和 \mathbf{R}_{YY} 分别为：

$$\mathbf{R}_{hY} = E(\mathbf{h}\mathbf{Y}) = \mathbf{R}_{hh}\mathbf{R}_{hY}\mathbf{F}^H\mathbf{Y} \tag{1.10}$$

$$\mathbf{R}_{\mathbf{Y}\mathbf{Y}} = E(\mathbf{Y}\mathbf{Y}) = \mathbf{X}\mathbf{F}\mathbf{R}_{\mathbf{h}\mathbf{h}}\mathbf{F}^H\mathbf{X}^H + \sigma^2\mathbf{I}_N \quad (1.11)$$

由此我们得到了对 OFDM 系统信道的 LMMSE 估计器和 LS 估计器。LMMSE 算法得到估计结果具有最小的均方误差，性能较优，但是其计算复杂度过高，LS 算法虽然性能相较于 MMSE 算法有所下降，但是其计算简单。

LS 估计器的性能容易受到信道加性噪声的影响，噪声越强，LS 估计器的 MSE 越大。

1.3 可见光各波段之间串扰估计

1.4 本章小结

参考文献

- 1 石钧. OFDM 无线通信系统信道估计及自适应算法的研究 [D]:[PhD Thesis].[S.l.]: 北京邮电大学, 2012.

心於至善

