

无线信道的内涵与扩展（II）——信道对通信的影响和解决方法

吕长伟

在无线通信系统中，发射机与接收机之间无线信号的传播路径非常复杂，有简单的视距传播，也会遭遇到各种复杂物体的阻挡和反射，移动台或反射体的运动速度也会对信号的传输产生很大影响。无线信道具有极大的随机性，非常难以进行理论分析。移动通信系统的性能主要受到无线信道的制约，主要表现为接收信号强度随时间变化，即所谓的“信道衰落”。如何克服无线信道的传播对通信性能造成的影响是移动通信系统设计中的难点，本文主要以此为出发点，介绍克服无线信道影响的一些基本原则和思路。本系列文章立足于科普，以最简单的处理方法为例介绍无线信道相关知识，实际应用中存在的问题以及基本的解决思路。

在无线通信领域，信道衰落是一个让无数通信人头疼的问题，这个“衰落”按功率变化的快慢可以分为大尺度衰落和小尺度衰落。通常来说，大尺度衰落主要由路径损耗和阴影效应引起，而造成小尺度衰落的原因主要是多径效应以及参数时变。信道衰落会严重影响信号的误码率。

在上一个小专题中，我们给出了无线信道的基本概念，简述了无线信道衰减、多普勒频移、多径效应，以及参数时变性。这些基本问题都可以归结为大尺度衰落或小尺度衰落。对于大尺度衰落中的阴影效应，主要由障碍物的遮挡引起，具有环境随机性，可以简单理解为在收发信机间相对移动过程中，较大的建筑物或山体等对信号造成了遮挡，引起信道强度的变化，这里不做过多的解释和推理。

一、系统模型

无线信道可以看成是一个传输系统，发送到空中的信号为其输入，接收来自空中的信号为输出。无线信道基本模型如图 1 所示。

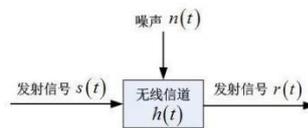


图 1. 无线信道基本模型

假设信道号的冲激响应为 $h(t)$ ，环境噪声为 $n(t)$ ，则接收信号可以表示为发射信号与信道冲激响应的卷积

$$r(t) = h(t) * s(t) + n(t)$$

接下来，我们基于此信道模型，以及信道衰减的类型，对如何克服信道的影响进行介绍。

二、自由空间传播损耗的影响及克服方法

当接收机和发射机之间是没有阻挡的视距路径时，可以用自由空间传播模型来表示信道环境。卫星通信和微波中继通信是典型的自由空间传播，移动通信在室外开阔环境也可能存在视距路径。自由空间传播模型预测接收功率电平的衰减是波长（或频率）和发射机到接收机距离的函数。在本系列的第一篇文章《无线信道的概念介绍》中，我们简单推导了无线信道的自由空间传播的强度衰减公式，我们这里重新写出如下（以分贝表示）

$$L_s = 32.44 + 20 \log d (km) + 20 \log f (MHz)$$

此时，信道会使信号有一个固定的衰减（参见本系列第一篇公众号文章），即

$$h(t) = \alpha$$

那么，接收信号可以表示为

$$r(t) = \alpha s(t) + n(t)$$

我们首先发送一个参考符号（或者叫导频信号、训练序列等），此时信号传输的帧结构如下图所示此时信号传输的帧结构如下图所示



图 2. 信道保持不变时的帧结构

我们通过简单的相除就可以获得信道的估计

$$\hat{h}(t) = \hat{\alpha} \approx \frac{r_0(t)}{s_0(t)}$$

到此，我们就可以对发送信号进行复原检测了，即

$$\hat{s}(t) \approx \frac{r(t)}{\hat{\alpha}}$$

这是无线信道对信号造成的影响最小的情况，解决方法也最简单，通过信道估计方法得到信道值，然后通过所谓的信道均衡得到发送信号的解析

。当然，信道估计方法有很多，比如常见的最大似然（LS）、最小均方误差（MMSE）等，而信道均衡也有很多类似的方法。

三、多普勒频移的影响及克服方法

移动通信，尤其是高速移动通信，会产生很大的多普勒频移，多普勒频移较强会导致信道强度快速变化，具体公式为（可参见第一篇公众号文章）

其中为多普勒频移。需要注意的是，此时还没有讨论多径传输的情况，只有一条传输路径，卫星通信和微波中继通信等场景就是这种情况。此时，由于存在多普勒频移，会导致信道快速起伏，多普勒频移越大，起伏越快。

针对这种情况，列举几种处理方法：

（1）针对多普勒频移较小的情况

如果多普勒频移较小，那么信道起伏并不太快，信道在一小段时间内可以近似为不变，此时可以采用前述的克服自由空间传播损耗方法简单处理，这里不再赘述。但是，此时信号传输的帧结构将发生变化，由于信道只能在一段时间内近似保持不变，所以每隔一段时间就要发送一次参考符号，帧结构如下图所示

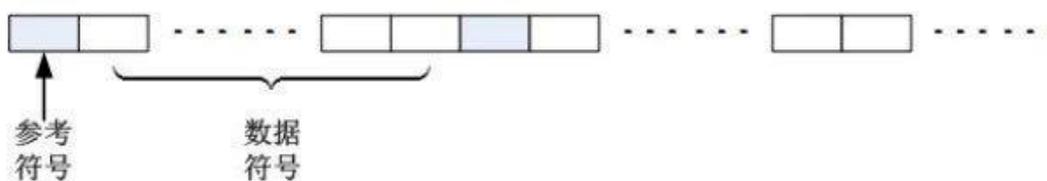


图 3. 信道时变时的帧结构

（2）针对多普勒频移较大的情况

如果多普勒频移比较大，那么信道起伏较快，此时再假设信道在一段时间内近似不变就不合适了，因为数据符号处的信道值与参考符号处的信道值并不相同。此时，仍可以采用图 3 所示的帧结构，但是信道估计方法需要有所改进。一般可以分两个步骤，第一个步骤是估计参考符号处的信道值，第二个步骤是推导数据符号处的信道值。对于参考符号处的信道值仍可采用前述的信道估计方法，而数据符号处的信道值一般需要应用插值的方法，常见

的插值方法有线性插值、样条插值、函数插值等，插值方法的好坏对最后估计的结果影响也很大。

四、多径效应的影响及克服方法

一般来讲，无线通信都不同程度的存在着多路径效应。在无线通信中，由于建筑、山脉、地面等物体对发射及发射出的电磁波的反射，使得接收机收到的信号中包含有大量的反射信号，这些反射信号所构成的多径信号对通信系统的影响主要包含如下两方面：

第一方面影响是符号间干扰。由于各条反射路径的长度不相同，所以各条多径信号到达接收机的。到达时间（TOA）也各不相同。因此，多径信号首先带来的一个问题就是时延扩展。譬如下图中发射一个三角形脉冲，而由于多径的存在，到达接收机的就是一个时延不同的信号叠加而成的类似于不规则脉冲，而且脉冲的宽度被展宽，即时延扩展。

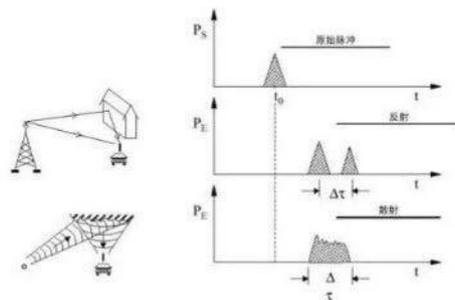


图 4. 多径效应导致的时延扩展

时延扩展的最直接影响就是带来了较大的 ISI（码间干扰），码间干扰的示意图如下图所示（图中以两条传输路径为例）

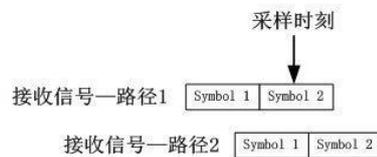


图 5. 码间干扰示意图

码间干扰必须通过相应的信道均衡算法将其消除。

第二方面影响是信号的快衰落。时延扩展通常是由不相关多径信号引起的。这些多径信号的 TOA 和 AOA（到达角）相差比较大，可以认为是不相关信号。同时，在几乎同一时刻到达的信号中，也包含有很多多径信号，这

些信号高度相关，很难区分，通常称作一簇多径信号。两者的区别可参加下图所示

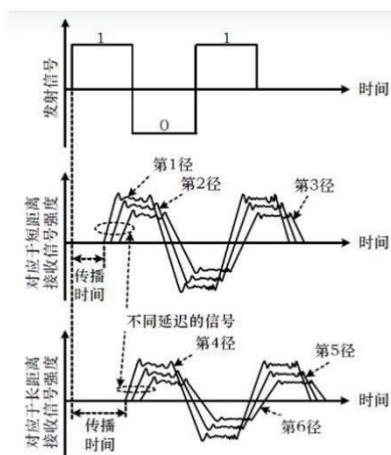


图 6. 多径信号对信号传输的不同影响

对于长距离接收信号，其时延扩展也较长，引起前述的符号间干扰。而对于短距离的接收信号，这些信号到达接收机时间相近，在采样频率内无法区分，同时这些信号相位各不相同，同相叠加，异相相抵，使得接收信号的幅度发生变化。再有，由于多普勒频移的存在，使得到达接收机的各条信号的相位在不断变化，这就造成接收机接收到的信号的幅度快速变化，称为快衰落。通常在移动通信系统中，接收到的信号幅度统计上服从瑞利分布或莱斯分布，每秒钟要衰落几十次。快衰落对移动通信的影响非常大，如果接收机的信道估计无法跟踪信号的衰落，会带来大量的误码和误包，使得通信质量急剧下降。

针对上述两类影响，需要不同的克服方法。针对信道的快衰落，基本思路仍旧可以采用前述方法进行信道估计予以解决，不同之处在于，此时信道变化比前述的场景更快，需要获得更精确的信道估计值。一方面可以通过增加参考符号的密度来提高信道估计的精确性，但是这样会降低通信的效率；另一方面，根据实际情况采用更复杂也更先进的信道估计算法，包括精确信道建模、滤波等方法。

对于符号间干扰，目前常用的方法有多载波 OFDM、单载波时域均衡、单载波频域均衡，以及 CDMA 系统中使用的 Rake 接收机技术等。这里简单介绍一下各种技术的基本思想，具体原理不一一赘述。多载波 OFDM 在指定频带上设置 N 个等频率间隔的子载波，每个子载波单独调制，此时每个子载波上的符号周期是同速率单载波系统的 N 倍，对符号间干扰的敏感性大为降低，从而有效地对抗符号间干扰。其实现的基本原理如图 7 所示。

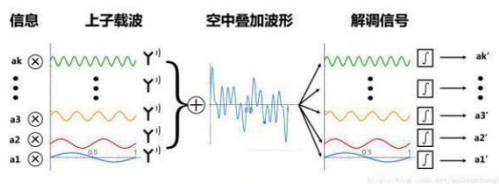


图 7. OFDM 系统基本框图

单载波系统一般通过参考符号对信道进行估计，在信道估计的基础上进行信道均衡，时域均衡的方法原理比较简单，但其运算复杂度较高。其示意图如图 8 所示。

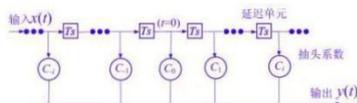


图 8. 时域均衡示意图

单载波频域均衡在系统结构上与 OFDM 类似，但在硬件结构上将快速傅里叶逆变换放在了接收端，这是二者的主要差别。它主要是基于把接收的数字信号按块在频域进行处理，运用信号处理中时域卷积等价于频域相乘的原理，降低符号间干扰的影响。而 Rake 接收机技术使用专用滤波器，检测展宽信号里的成分，将这些成分收集起来，并将它们相干的叠加起来，叠加的方法是对早到路径采用比晚到路径更多的延时，其实现方法如图 9 所示。

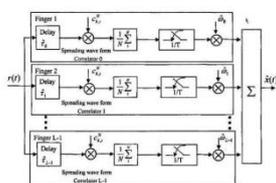


图 9. Rake 接收机实现框图

五、参数时变性的影响及克服方法

对于参数时变性，主要指路径衰减、多普勒频移、路径延时，以及多径个数随时间变化，这将导致最后的信道变化非常复杂。针对这一问题的解决手段目前也很有限，没有公认行之有效的方法。主要通过增加参考符号密度，或者对信道更精确的建模，求模型参数等实现，这里就不做过多说明了。

六、小结

无线信号传输受环境影响，十分复杂，通常针对不同的环境提出不同解决方法，难以找到一种烦方法彻底解决所有问题。因此，从无线通信诞生伊始，克服无线信道对通信的影响就是一个重要研究问题。而且，移动无线通信的每一次更新换代，都离不开对无线信道的进一步高效利用，在下一篇文章中，我们将讲述无线信道与无线通信主要关键技术的关系。

本文作者：吕长伟，博士，深圳信息职业技术学院。研究方向：无线信道建模、估计和预测。

版权所有：临菲信息技术港，欢迎转发。

(本文原载：微信公众号：临菲信息技术港)

