

# 无线信道的内涵与扩展(I)——无线信道的概念介绍

吕长伟

## 1、引言

远古的时候，人们之间通信基本靠“吼”，后来，边境地区士兵为了快速传递敌人来犯信息使用了“烽火狼烟”。那时，人类远距离通信手段都不是实时的，实时远距离沟通是一件奇妙且不可想象的事情。人类拥有天生的“贪婪和欲望”，人们当然希望声音可以像狼烟那样一直远传，且实时快速。1875年，贝尔先生的那句留存千古的名言“沃特森先生，快来帮帮我”，标志着有线电话的诞生，远距离实时通信从此实现。

（选读：电话给人类社会带来极大的方便，它的发明人是美国科学家贝尔。1875年6月2日，几经失败后，贝尔和他的助手沃特森对实验装置进行又一次测试。沃特森在紧闭了门窗的另一个房间把耳朵贴在音箱上准备接听。贝尔在操作时不小心把硫酸溅到脚上，疼痛使他叫了起来“沃特森先生，快来帮帮我”。这句话通过实验中的电话传到了另一个房间工作的沃特森耳朵里，这句话成为第一句人类通过电话传送的声音。一个偶然，使这样一句普通的话语载入了通信发展的史册。）

人类的“贪婪和欲望”远不止如此，没过多久又开始悄悄作怪：有线的方式还是不方便，不能随时、随地同随便一个人讲话，要是不用电话线也能通信就好了。但是想想容易，要有实质的突破很难。有线通信是有形的东西，电流在电话线上“流动”，信息就在这一有形的载体上传递。无线的情况下，通信的载体是看不见、摸不着的，怎么办？无形的东西总是给人很神奇的感觉，掌握起来也很困难，正如我们的祖先发现了人体中一种无形的气血运行通道，即经络，但是西方解刨学无法证实这一无形的东西，所以很长时间内都怀疑经络的存在。无线通信的原理基础与中医经络有点类似，麦克斯韦最早预言了电磁波的存在，最重要的是其所预言的电磁波可以在无形的自由空间传播，即时变电场可以生成磁场，时变磁场又可以生成电场。这样，在理论上允许自我维持的电磁波传播于空间，信息就可以随着电磁波在无形的自由空间传播了。但是，麦克斯韦的电磁波理论遭到了质疑，普通受众无法理解。

（选读：麦克斯韦晚年的生活充满了烦恼，他的电磁学说没有人理解，妻子又久病不愈。这双重的不幸，压得他筋疲力尽。为了看护妻子，他曾经连续三个星期没有在床上睡过觉。尽管这样，他的演讲，他的实验室工作，却从未中断。1879 年是麦克斯韦生命的最后一年，他仍然坚持不懈的宣传电磁理论。这时，他只有两个听众，一个是来自美国的研究生，另一个是后来发明电子管的弗莱明。空旷的阶梯教室里，只在头排坐着两个学生。麦克斯韦夹着讲义，照样步履坚定的走上讲台，他面孔消瘦，表情严肃而庄重，此时，他不是在向两个听众，而是在向全世界解释自己的理论。1879 年 11 月 5 日，麦克斯韦因患癌症去世，终年只有 49 岁。他的功绩，在他活着的时候没有得到人们的重视。他去世后，人们才公认麦克斯韦是“牛顿以后世界上最伟大的数学物理学家”。）

这种状况一直持续到 1887 年，麦克斯韦的恩人赫兹先生证实了关于电磁波存在的预言，才明确了信息无线传播的基本原理。至此，无线通信的时代来临了。在无线通信中，无形的信道对于通信来说至关重要，至于重要在哪里，请允许我卖个关子，在您读完本系列文章时，相信您会有一个结论。

## 2、无线信道

对于学通信的人来说，提到无线信道，大家都有直观的概念，但真要说出一个具体的含义，相信很多人又一时难以概括出来。

咱们还是先以有线通信相对照，对于有线通信中的电话语音通信，电流在电话线上传递信息；对于有线通信的光纤数据通信，光在光纤上传递信息。那么，有线通信的那条线就是信道，那条线对传递信号的影响决定了信道的特性。

对于无线通信，信息依附在电磁波上从发送端传送到接收端，其间并没有一个有形的连接，电磁波并不需要介质来传播，那么，无线信道到底是什么？对于这个问题，我查了一下百度，百度百科给出的答案是“对于无线电波而言，它从发送端传送到接收端，其间并没有一个有形的连接，它的传播路径也有可能不只一条，我们为了形象地描述发送端与接收端之间的工作，可以想象两者之间有一个看不见的通路衔接，把这条衔接通路称为信道”。这个答案没错，但是还是给人一种看不见、摸不着的感觉，因为确实找不到一个介质来承载电磁波

传播。

我们再回过头来看看有线通信，有线通信那根线（信道）是一个实际存在的介质，但是我们也应该注意到，这根线就是信号传输的环境，这根线是什么并不重要，重要的是这根线对信号传输有什么影响。也就是说，这一过程的本质是：这根线会对传输的信号产生影响，比如电信号在电话线上传输会随着距离增加而衰减，这些影响构成了信道的所有特性。同样，对于无线通信，虽然发送端和接收端之间没有一个有形的介质，但是，环境会对电磁波传播

产生影响，比如电磁波的幅度随传播距离会衰减，环境及收发信机间的相对移动会对电磁波的频率产生偏移等，这些所有的影响就构成了无线信道的所有特性。现在，我们可以总结一下：无线通信中并不存在有形的介质作为信道，此时信道的本质是环境对电磁波传输的影响，把这些影响抽象出来，就是所谓的无线信道。

我们学知识学了这么多年，都有一个偏执，就是一定要明确知道一个知识的“定性”和“定量”描述才会安心。前面我们描述了无线信道的所谓“定性”描述，接下来我们对信道进行“定量”描述，即用几个简单的公式定义信道的几个性质，给出信道的公式表述。

为了明确定义无线信道，必须把环境对无线信道的影响表述出来。主要影响包括电磁波强度衰减、多普勒频移、多径效应，以及时变性。这里需要提前说明的是，下述所有分析都基于自由空间环境，下面我们一一阐述。

(1) 强度衰减。电磁波的强度衰减比较好理解，无线电波在自由空间传播时，其单位面积中的能量会因为扩散而减少。这种减少，称为自由空间的传播损耗。如图 1 所示，发射功率为  $P_T$ ，发射天线增益为  $G_T$ ，则以发射源为中心， $d$  为半径的球面上单位面积的功率为：

$$S = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2}。$$

根据电磁场理论，如果接收天线增益为  $G_R$ ，接收天线的有效接收面积为

$$A = \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi}。$$

则接收机接收到的信号载波功率为

$$P_R = \frac{P_T G_T A}{4\pi d^2} = P_T G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2。$$

则路径损耗为

$$P_T / P_R = \frac{1}{G_T G_R} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

如不考虑天线增益，则路径损耗为

$$L_S = P_T / P_R = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi f d}{c} \right)^2$$

其中  $f$  为载波频率， $c$  为光速。

以分贝数表示为：

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

即路径衰减与电磁波的频率及距离有关，而实际的路径衰减一般表示为

$$\alpha = \frac{1}{L_S}$$

上式即路径的损耗。在仅考虑路径损耗的情况下，无线信道可以表示为

$$h(t) = \alpha$$

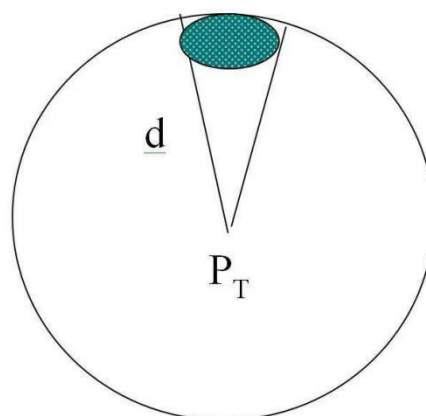


图 1. 电磁波能量扩散示意图

(2) 多普勒频移。多普勒频移，大家应该比较清楚，高中物理一定接触过。例如，火车由远及近时，声音会越来越刺耳，如图 2 所示。多普勒效应主要内容为物体辐射的波长因为波源和观测者的相对运动而产生变化。在运动的波源前面，波被压缩，波长变得较短，频率变得较高；在运动的波源后面时，会产生相反的效应。波长变得较长，频率变得较低；波源的速度越高，所产生的效应越大。

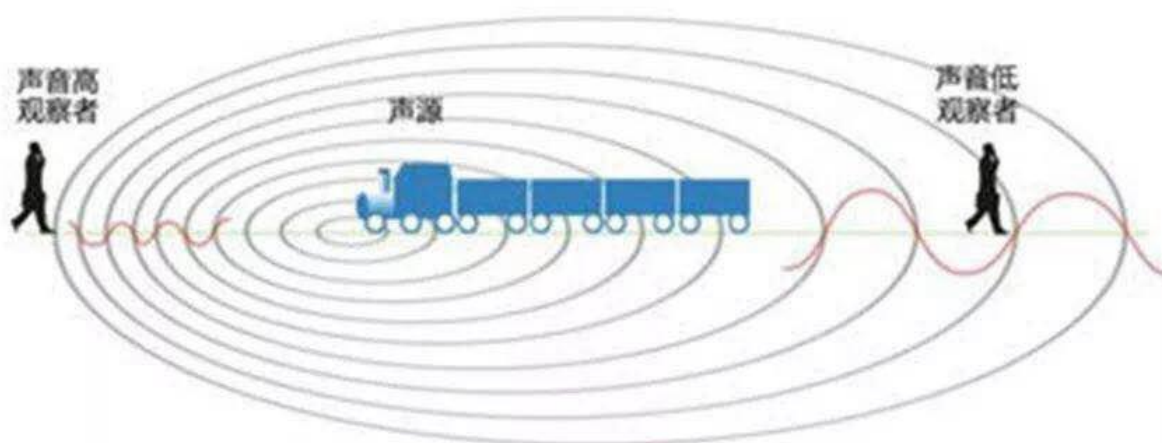


图 2. 多普勒效应示意图

在移动通信中，当移动台和基站相对运动时，通信电磁波的频率会发生变化：当两者相互靠近时，接收频率会变高；相互远离时，频率会变低。多普勒频偏的大小与终端和基站的相对移动速度  $v$  有很大关系，也和无线电波的波长  $\lambda$  有关，多普勒频移的大小还和入射角  $\theta$  有很大关系，入射角  $\theta$  是终端与基站连线与相对运动速度  $v$  的方向的夹角。多普勒频移的公式可表达为

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda} \cos \theta$$

综合考虑信号的多普勒频移和路径衰减，无线信道可表示为

$$h(t) = \alpha e^{-j(2\pi\Delta f t + \varphi)}$$

其中  $\varphi$  为初始角度。

**(3) 多径效应。**电磁波从发射端到接收端常有许多时延不同、损耗各异的传输路径，可以是直射、反射或是绕射。无线电波的多径效应是指不同路径的相同信号在接收端叠加会增大或减小接收信号能量的现象，如图 3 所示。

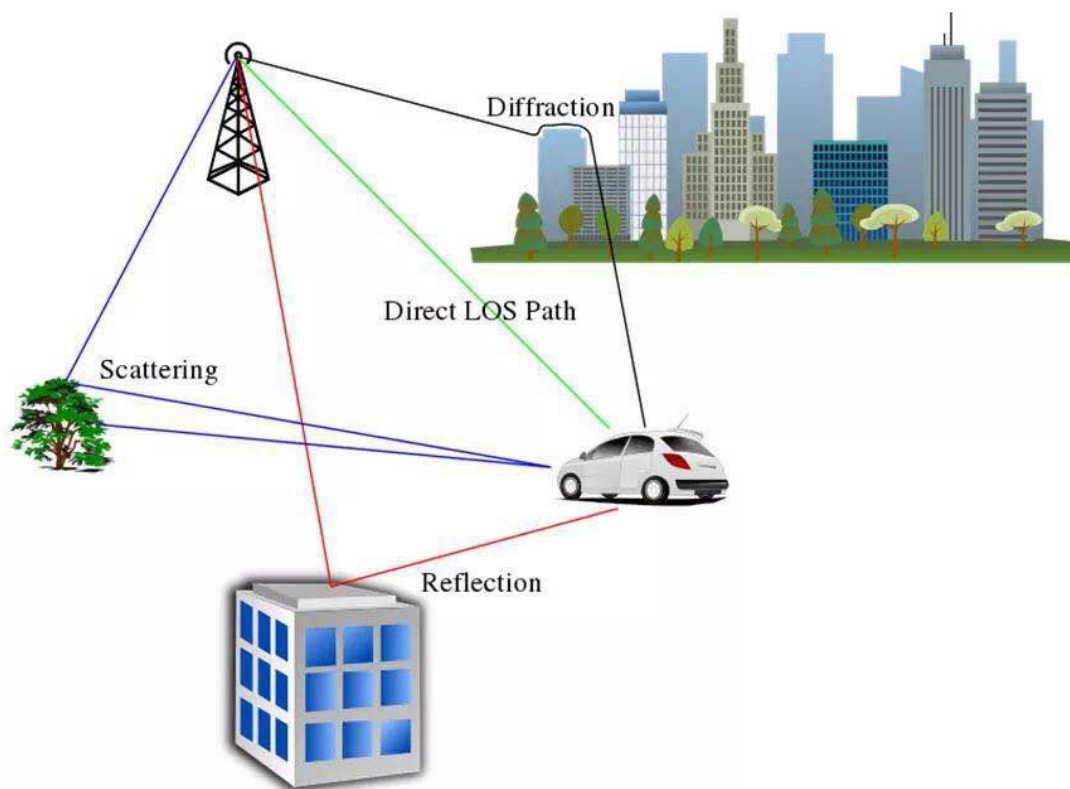


图 3. 多径传输示意图

由于各个路径的入射角一般不同，所以其多普勒频移一般不同；同时，各个路径的路径长度也不同，所以衰减也有差别；再有，各个路径的延时也随路径长度的不同而不同。此时无线信道可以表示为

$$h(t, \tau) = \sum_{l=0}^{L-1} \alpha_l e^{-j(2\pi \Delta f_l t + \phi_l)} \delta(\tau - \tau_l)$$

其中  $\delta(\tau)$  是单位脉冲函数， $\tau_l$  是第  $l$  条路径的延迟， $L$  为多径数目。这样一个无线信道由多条传输路径组成，随时间变化起伏。

(4) 参数时变性。由于发射机、接收机，以及障碍物的相对移动，将导致路径衰减  $\alpha_l$ 、多普勒频移  $f_l$ 、路径延时  $\tau_l$ ，以及多径个数  $L$  都随时间变化。这样，无线信道可以表示为

$$h(t, \tau) = \sum_{l=0}^{L(t)-1} \alpha_l(t) e^{-j(2\pi \Delta f_l(t) t + \phi_l)} \delta(\tau - \tau_l(t))$$

### 3、进一步解释

需要强调的是，这种参数的时变性主要是发射机、接收机，以及环境三者之间的相对移动引起的。在这里，为了更好的解释无线信道公式的含义，探讨发射机、接收机，以及环境三者之间相对位置的变化与信道参数的关系：

- 1) 如果电磁波传输距离是固定的，则衰减也固定为  $\alpha_l$ ；一旦电磁波传输距离随时间变化，则衰减  $\alpha_l(t)$  也是时变的。
- 2) 多普勒频移的时变性较为复杂，大致可

以分为三种情况。一是发射机、接收机，以及环境三者之间没有相对移动，环境保持不变，则多普勒频移也不存在，即  $\Delta f = 0$ ；二是三者之间有相对移动，但速度  $v$  和入射角  $\theta$  在运动过程中保持不变，此时多普勒频移存在，且保持恒定不变，即我们前面得到的公式；三是发射机、接收机，以及环境三者之间存在随机的运动，即速度  $v$  和入射角  $\theta$  在运动过程中是时变的，此时多普勒频移也是时变的。

- 3) 路径时延的时变性也好理解，随着三者之间的相对移动，电磁波传输距离会发生变化，时延就是时变的。
- 4) 多径个数的时变性可以这样理解：参照图 3 的多径传输示意图，在小汽车接收机移动过程中，树木、楼宇等反射电磁波的障碍物可能会消失或出现，这就会导致多径数目随时间变化。

通过这样一个分析的过程，我们大体上可以得到这样一个结果：一旦发射机、接收机，以及周边环境的相对位置固定了，无线信道就是固定的，不会随时间变化；当三者有相对位移时，无线信道同样随时间变化。无线信道是基于三者相对位置的一个数值。

**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 )

