

# 多普勒频移 Doppler Shift

## 1.

当移动台以恒定的速率沿某一方向移动时，由于传播路程差的原因，会造成相位和频率的变化，通常将这种变化称为**多普勒频移**。

**多普勒效应造成的发射和接收的频率之差称为多普勒频移**。它揭示了波的属性在运动中发生变化的规律。

英文名称：Doppler Shift，**多普勒效应**是为纪念克里斯琴·多普勒·约翰（Doppler, Christian Johann）而命名的，他于 1842 年首先提出了这一理论。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。

- ① 在运动的波源前面，波被压缩，波长变得较短，**频率**变得较高（**蓝移 blue shift**）。
- ② 多普勒频移，当运动在波源后面时，会产生相反的效应。波长变得较长，频率变得较低（**红移 red shift**）。

## 2.

多普勒频移，当运动在波源后面时，会产生相反的效应。波长变得较长，频率变得较低（**红移 red shift**）。波源的速度越高，所产生的效应越大。根据光波红（蓝）移的程度，可以计算出波源循着观测方向运动的速度

多普勒频移及信号幅度的变化等如图 2 所示。当火车迎面驶来时，鸣笛声的波长被压缩（如图 2 右侧波形变化所示），频率变高，因而声音听起来尖利刺耳。当火车远离时，声音波长就被拉长（如图 2 左侧波形变化所示），频率变低，从而使得声音听起来减缓且低沉。



图 2 声波的波普勒效应引起的多普勒频移

这种现象也存在于其他类型的波中，例如光波和电磁波。科学家们观察发现，从外太空而来的光波，其频率在不断变低，既向频率较低的红色波段靠拢，这是光波遵从多普勒效应从而引起多普勒频移的例证。对于电磁波，高度运动的物体上（例如高铁）进行无线通信，会出现信号质量下降等现象，就是电磁波存在多普勒频移现象的实例。

多普勒频移导致无线通信中发射和接收的频率不一致，从而使得加载在频率上的信号无法正确接收，甚至无法接收到。

### 3.

#### A. 发生原因

把声波视为有规律间隔发射的脉冲，可以想象若你每走一步，便发射了一个脉冲，那么在你每走一步时，面前的声源发出的脉冲相对于你的传播距离比你站立不动时近了一步，而在你后面的声源则比原来不动时远了一步。或者说，在你之前的脉冲频率比平常变高，而在你之后的脉冲频率比平常变低了。

所谓**多普勒效应**就是当发射源与接收体之间存在相对运动时，接收体接收的发射源发射信息的频率与发射源发射信息频率不相同，这种现象称为**多普勒效应**，**接收频率与发射频率之差称为多普勒频移**。声音的传播也存在多普勒效应，当声源与接收体之间有相对运动时，接收体接收的声波频率  $f'$  与声源频率  $f$  存在多普勒频移  $\Delta f$  (doppler shift) 即

$$\Delta f = f' - f$$

- ① 当接收体与声源相互靠近时，接收频率  $f'$  大于发射频率  $f$  即：  $\Delta f > 0$  **压缩**
- ② 当接收体与声源相互远离时，接收频率  $f'$  小于发射频率 即：  $\Delta f < 0$  **拉长**

可以证明若接收体与声源相互靠近或相互远离的速度为  $v$ ，声速为  $c$ ，则接收体接收声波的多普勒频率为：

$$f' = f \cdot (c + v_1) / (c + v_2)$$

括号中分子和**分母**的加、减运算分别为“接近”和“远离”之意。

多普勒频移最基本的计算公式是：

$$f_m = \frac{\text{移动台的移动速度 } u \times (\text{载波频率}) \times \cos \alpha}{\text{光速}}$$

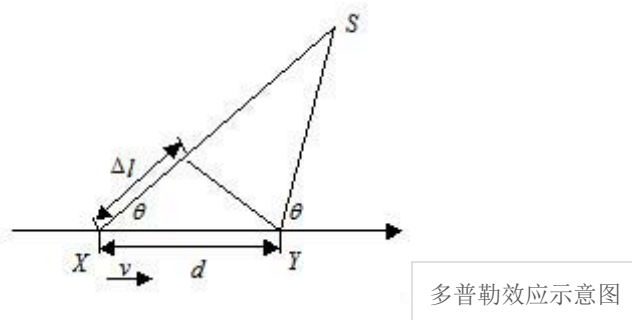
多普勒频移基本公式

例如在一个运动速度为 100 km/h 的列车上，使用 GSM 900 MHz 的手机进行通话，假设发射频率为 900 MHz，则最大的多普勒频移为  $f_m = 100000 / 3600 / 300 \times 900 \times 1 = 83$  Hz，此时列车移动的方向与无线电波发射的方向一致。如果列车运动的方向与发射方向成  $90^\circ$  角，则无多普勒频移，夹角在两者之间时，为 0~83 Hz 的范围值。如列车移动方向与无线电波发射的方向相反或呈  $90^\circ \sim 180^\circ$  角，则频移为负值，范围为 -83 Hz~0。无线通话中频率误差的标准一般为 0.05 ppm，即百万分之 0.05，则 900 MHz 允许的频率误差为  $900 \times 0.05 = 45$  Hz。

从而可以看出，列车运动时通话的接收频率的误差经常会超过频率误差，多普勒频移已经影响到了通话质量。因此消除或降低多普勒频移对无线通信的影响，是高速运动中进行无线通信必须解决的问题。解决这个问题通常采用的方法是：**估算多普勒频移，并对估算的频率偏差进行补偿**。尤其是多普勒效应影响非常大的水中无线通信，业界和学术界已经有很多研究成果，采用的方法大多都是通过某些算法进行多普勒频移的消除或补偿。

## B. 多普勒频移

当移动台以恒定的速率  $v$  在长度为  $d$ ，端点为  $X$  和  $Y$  的路径上运动时收到来自远端源  $S$  发出的信号，如下图所示。



无线电波从源  $S$  出发，在  $X$  点与  $Y$  点分别被移动台接收时所走的路径差为：

$$\Delta l = d \cos \theta = v \Delta t \cos \theta$$

由于路径差造成的接收信号相位变化值为：

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi v \Delta t}{\lambda} \cos \theta$$

由此可得出频率变化值，即多普勒频移为：

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos \theta$$

由此可知，多普勒频移与移动台运动速度及移动台运动方向以及无线电波入射方向之间的夹角有关。若移动台朝向入射波方向移动，则多普勒频移为正，导致接收频率上升。若移动台背向入射波方向运动，则多普勒频移为负，接收频率下降。信号经不同方向传播，其多径分量造成接收机的多普勒扩散，因而增加了信号带宽。

### 1) 应用实例

多普勒效应不仅仅适用于声波，它也适用于所有类型的波形，包括光波。科学家 Edwin Hubble 使用多普勒效应得出宇宙正在膨胀的结论。他发现远处银河系的光线频率在变低，即移向光谱的红端。这就是红色多普勒频移，或称红移。若银河系正移向蓝端，光线就成为蓝移。

在卫星移动通信中，当飞机移向卫星时，频率变高，远离卫星时，频率变低，而且由于飞机的速度十分快，所以我们在卫星移动通信中要充分考虑“多普勒效应”。另外一方面，由于非静止卫星本身也具有很高的速度，所以现在主要用静止卫星与飞机进行通信，同时为了避免这种影响造成我们通信中的问题，我们不得不在技术上加以各种考虑。也加大了卫星移动通信的复杂性。

声波的多普勒效应也可以用于医学的诊断，也就是我们平常说的彩超。彩超简单的说

就是高清晰度的黑白 B 超再加上彩色多普勒，**首先说说超声频移诊断法，即 D 超**，此法应用多普勒效应原理，当声源与接收体（即探头和反射体）之间有相对运动时，回声的频率有所改变，此种频率的变化称之为频移，D 超包括脉冲多普勒、连续多普勒和彩色多普勒血流图像。彩色多普勒超声一般是用自相关技术进行多普勒信号处理，把自相关技术获得的血流信号经彩色编码后实时地叠加在二维图像上，即形成彩色多普勒超声血流图像。由此可见，彩色多普勒超声（即彩超）既具有二维超声结构图像的优点，又同时提供了血流动力学的丰富信息，实际应用受到了广泛的重视和欢迎，在临床上被誉为“**非创伤性血管造影**”。

## 2) 移动无线信道的特性参数（小尺度衰落）

1. 小尺度衰落表征了接收信号短时间内的快速移动。
2. **移动无线信道的主要特征是多径传播。**

### C. 多径衰落的基本特性

1. 多径效应
2. 多普勒效应：引起多普勒频移

### D. 衰落特性参数

1. 时间色散：RMS 时延扩展、相干带宽
2. 频率色散：多普勒扩展、相干时间
3. 空间色散：角度扩展、相干距离