

扩频技术概述

许多文献和书籍已对扩频通信这一专题进行了论述,但是仍有许多工程师仍然对它存在一些疑问。实际上,如果不通过公式推导,一些复杂的概念只是用简单的解释很难被人们接受。本文将尽可能全面的论述扩频技术所包括的所有方面。

有关扩频通信技术的观点是在 1941 年由好莱坞女演员 Hedy Lamarr 和钢琴家 George Antheil 提出的。基于对鱼雷控制的安全无线通信的思路,他们申请了美国专利#2.292.387。不幸的是,当时该技术并没有引起美国军方的重视,直到十九世纪八十年代才引起关注,将它用于敌对环境中的无线通信系统。解决了短距离数据收发信机、如:卫星定位系统、移动通信系统、WLAN 和蓝牙技术等应用的关键问题。扩频技术也为提高无线电频率的利用率提供帮助。

扩频理论的基础

在 Shannon 和 Hartley 信道容量定理中可以明显看出频谱扩展的作用:

$$C = B \cdot \log_2 (1+S/N)$$

式中: C 是信道容量、单位为比特每秒 (bps),它是在理论上可接受的误码率 (BER) 下所允许的最大数据速率; B 是要求的信道带宽,单位是 Hz; S/N 是信噪比。C 表示通信信道所允许的信息量,也表示了所希望得到的性能,带宽 (B) 则是付出的代价,因为频率是一种有限的资源, S/N 表示周围的环境或者物理的特性。用于恶劣环境 (噪声和干扰导致极低的信噪比) 时,从上式可以看出: 需要提高信号带宽 (B) 来维持或提高通信的性能。修改上面的公式得:

$$C/B = (1/\ln 2) * \ln(1+S/N) = 1.443 * \ln(1+S/N)$$

由 MacLaurin 级数: $\ln(1+x) = x - x^2/2 + x^3/3 - x^4/4 + \dots + (-1)^{k+1}x^k/k + \dots$

得: $C/B = 1.443[S/N - 1/2 * (S/N)^2 + 1/3 * (S/N)^3 - \dots]$

在扩频技术应用中,信噪比较低。假定较大的噪声使信噪比远远小于 1 ($S/N \ll 1$), 则 Shannon 表示式近似为: $C/B \approx 1.433 * S/N$

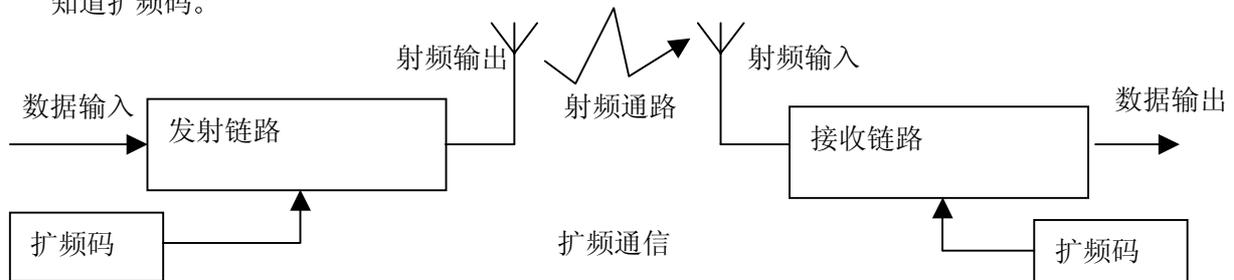
可进一步简化为: $C/B \approx S/N$ 或 $N/S \approx B/C$

在信道中对于给定的信噪比要无差错发射信息,我们仅仅需要提高发射的带宽。这个原理似乎简单、明了,但是具体实施非常复杂。

定义

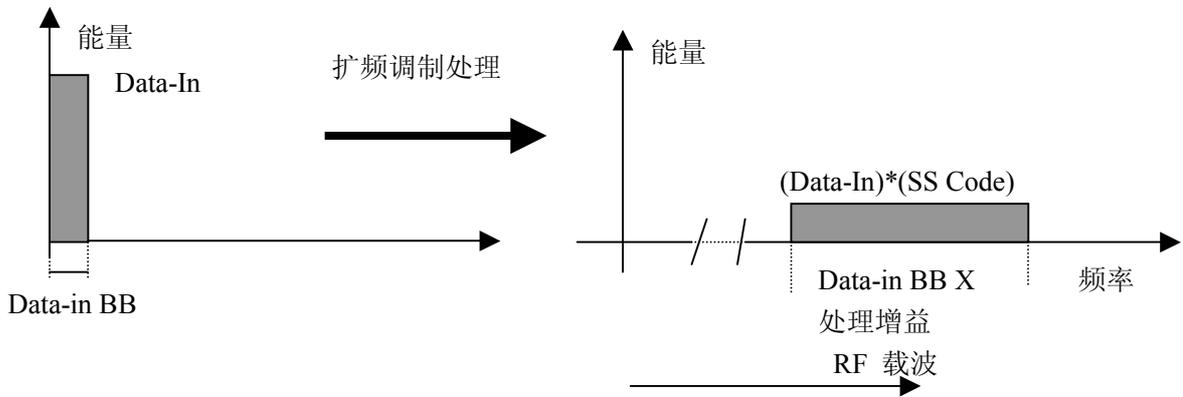
扩频技术在具体实施时由多种方案,但思路相同:把索引 (也称为码或序列) 加入到通信信道,插入码的方式正好定义了所讨论的扩频技术。术语“扩频”指将信号带宽扩展几个数量级,在信道中加入索引即可实现扩频。扩频技术更加精确的定义是:扩频是通过注入一个更高频率的信号将基带信号扩展到一个更宽的频带内的射频通信系统,即发射信号的能量被扩展到一个更宽的频带内使其看起来如同噪声一样。扩展带宽与初始信号之比称为处理增益 (dB),典型的扩频处理增益可以从 20dB 到 60dB。

采用扩频技术,在天线之前发射链路的某处简单的引入相应的扩频码,这个过程称为扩频处理,结果将信息扩散到一个更宽的频带内。在接收链路中数据恢复之前移去扩频码,称为解扩。解扩是在信号的原始带宽上重新构建信息。显然,在信息传输通路的两端需要预先知道扩频码。

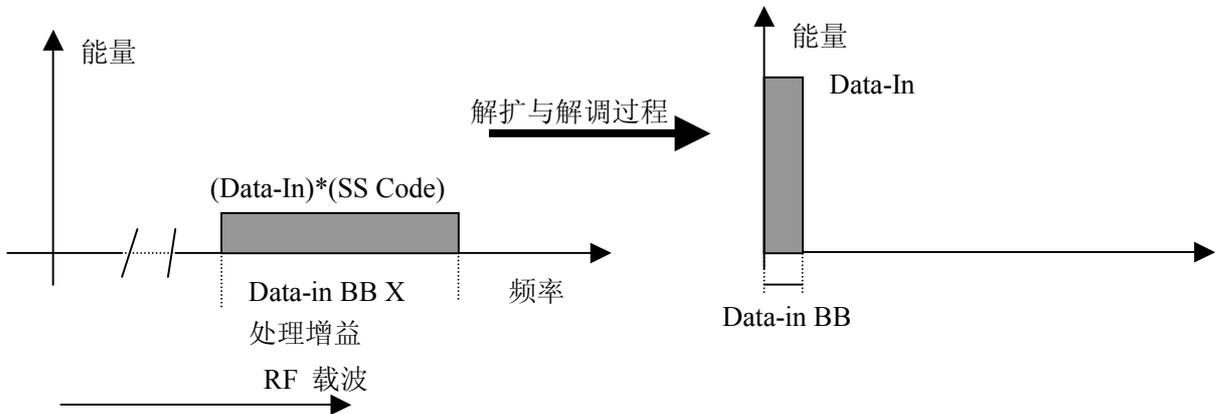


扩频与解扩处理

下图对通信链路中信号带宽进行了评估，扩频调制作用于通用调制器（如 BPSK）的前端或直接转换，没有接受扩频的代码保持不变，没有扩频。

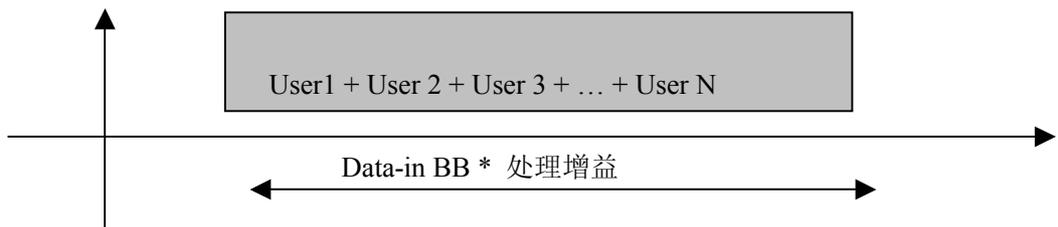


解扩过程如下图所示：



解扩通常在解调之前进行，在传输过程中加入的信号（例如干扰或阻塞）将在解扩处理中被扩频。

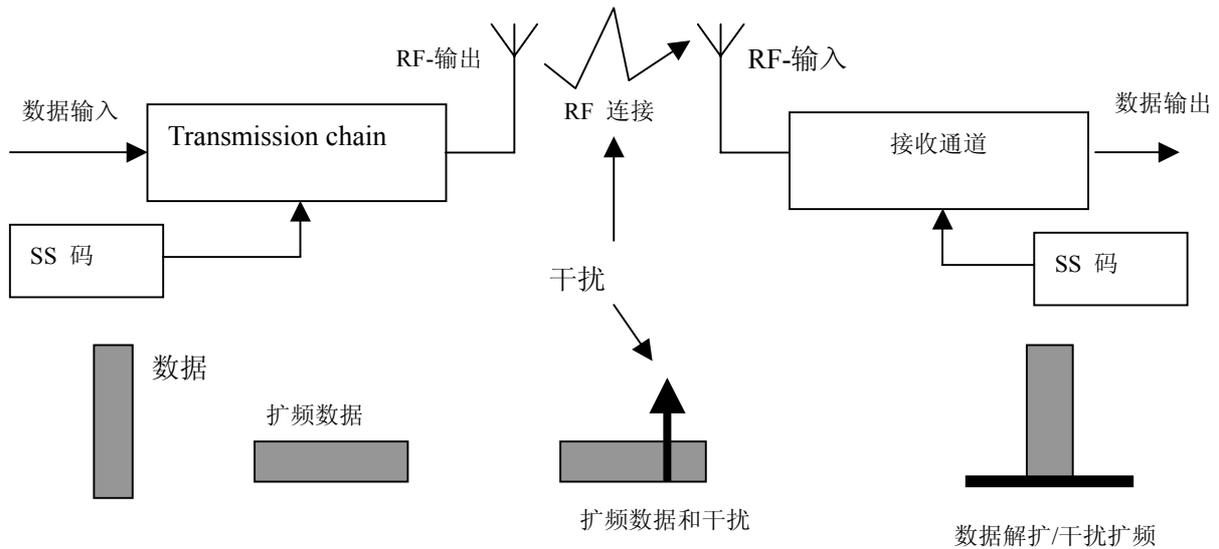
与规则的窄带技术相比，扩频过程是一种宽带技术。例如，W-CDMA 和 UMTS 属于需要更宽频带（相对于这窄带无线电设备）的宽带技术。由于扩频占用更宽的频带，浪费了有限的频率资源。然而，所占用的频带可以通过多用户共享同一扩大了频带得到补偿。



扩频对系统性能改善

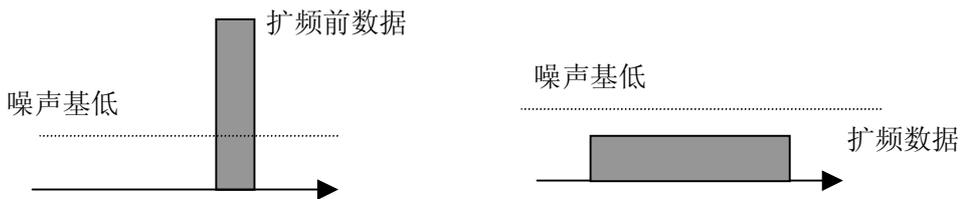
抗干扰和抗阻塞性能：

通过扩频可以获得较高的抗干扰和抗阻塞特性，这也正是扩频的优势。因为干扰和阻塞信号不带有扩频因子，所以被抑制掉。解扩处理后只有包含扩频因子的、所希望的信号出现在接收器内。干扰信号可能是窄带的、也可能是宽带的；如果干扰信号不包括扩频因子，解扩后可忽略其影响。这种抑制能力同样也作用于其它不具有正确扩频因子的扩频信号，正是由于这一点，扩频通信允许不同用户共享同一频带（比如 CDMA）。



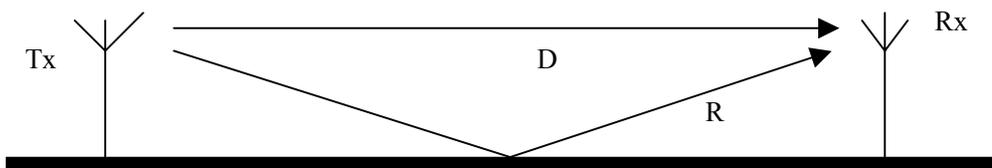
交叉抑制:

交叉抑制是通过扩频获得的第二个优势。因为没有授权的用户不知道扩展原始信号的扩频因子，所以他们无法解码。当然，如果扩频因子很短，则可利用扫描方法破解。更加可喜的是，扩频通信允许信号低于噪声基底，因为扩频处理降低了频谱密度（总能量相同，但被展宽到整个频域内）。这样，可以将信息隐藏起来，这一效果是直序扩频的显著特点。



衰落（多径影响）抑制:

无线信道通常具有多径传播效应，从发射端到接收端存在不止一条路径。这些路径是由于空气的反射或折射以及从地面或物体（如建筑物等）的反射产生的。



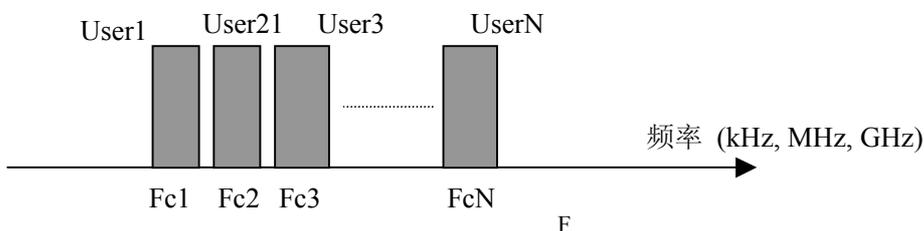
反射路径（R）对直接路径（D）产生干扰被称为衰落现象。因为解扩过程与信号 D 同步，所以，即使信号 R 包含有相同的扩频因子，也同样会被抑制掉。可以对反射路径的信号进行解扩、并将其均方根值叠加到主信号上。

扩频技术在 CDMA 中的应用

值得注意的是：扩频不是一种调制方式，不应该同其他类型的调制相混淆。例如，我们能够利用扩频技术发射一个经过 FSK 或 BPSK 调制的信号。从编码基本理论来看，扩频也能作为实现多址通信的一种方法，至今为止，主要有三种方式：

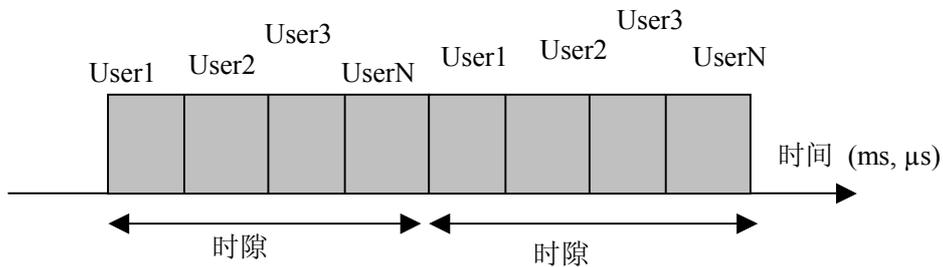
FDMA: 频分多址

频分多址（FDMA）给每个通信信道分配一个特定的载波频率，用户数受频谱的频段数限制。FDMA 的频带利用率最低，典型应用包括：无线广播、TV、AMPS 和 TETRA/PLME.



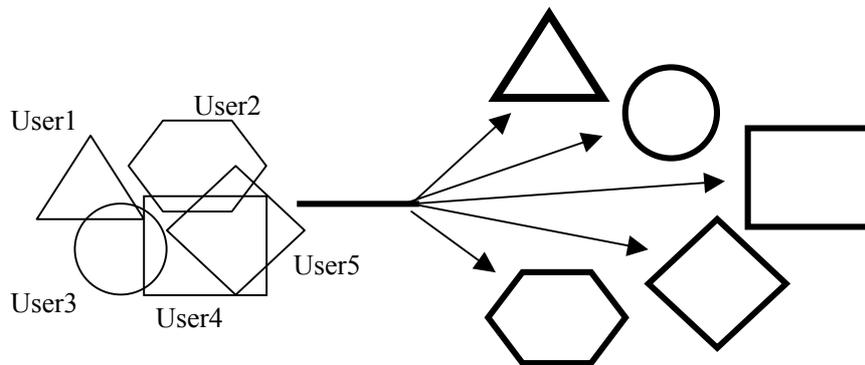
TDMA: 时分多址

TDMA 中，不同用户之间的通信基于被分配的时隙。这样，在一个载波频率上可以建立不同的通信信道。TDMA 被应用于 GSM、DECT、TETRA 和 IS-136。



CDMA: 码分多址

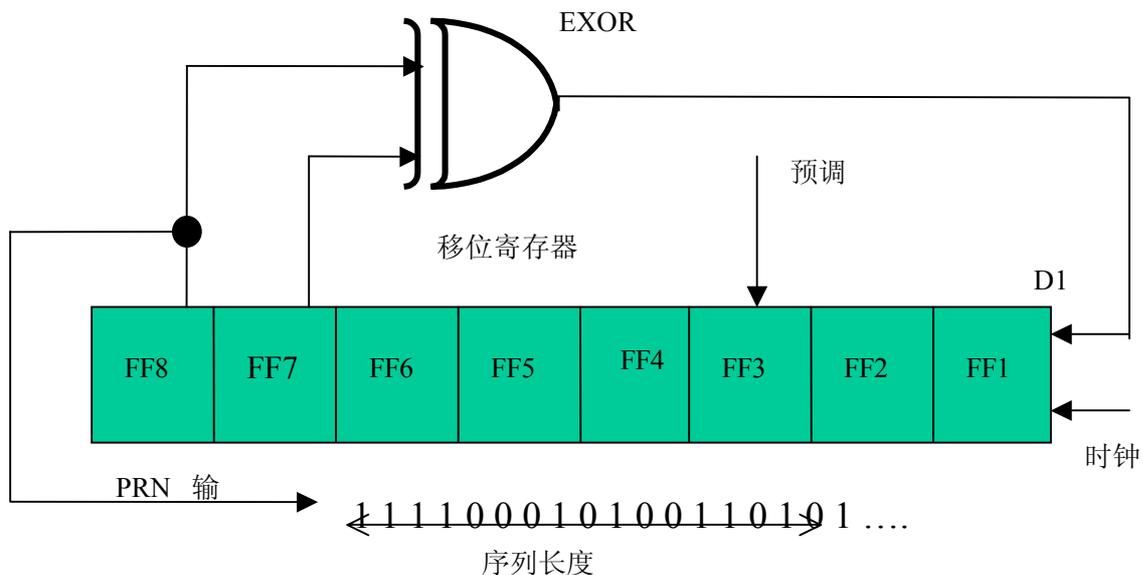
CDMA 的空间接入取决于扩频因子或码。从某种角度上讲，扩频是 CDMA 的一种方式。典型应用包括：IS-95 (DS)、IS-98、蓝牙技术和 WLAN。



实际应用中可以综合利用上述多址方式，例如：GSM 组合了 TDMA 和 FDMA，利用不同的载波频率定义了拓扑区域（蜂窝 cells），并在每一个蜂窝内设置时隙。

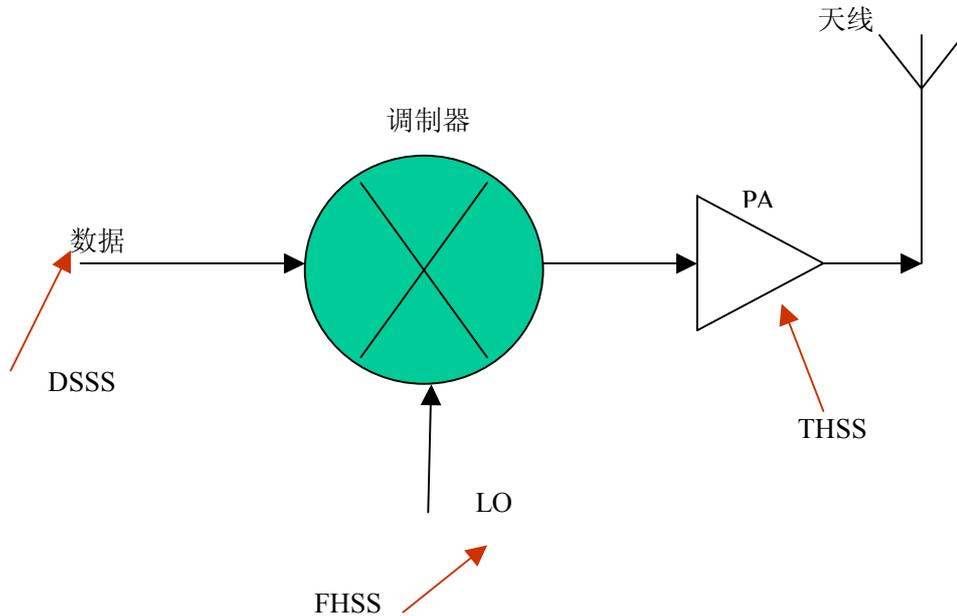
扩频和编解码因子

扩频的主要特点就是发射机和接收机必须预先知道一个预置的扩频码或因子。扩频码必须足够长，尽量接近类似于噪声的随机数字序列。但是，在任何情况下，他们必须保持可恢复性。否则，接收机将不能提取发射信息。因此，这序列是近似随机的，扩频码通常称为伪随机码 (PRN) 或伪随机序列。通常采用反馈型移位寄存器产生伪随机序列：



扩频技术的不同调制方式

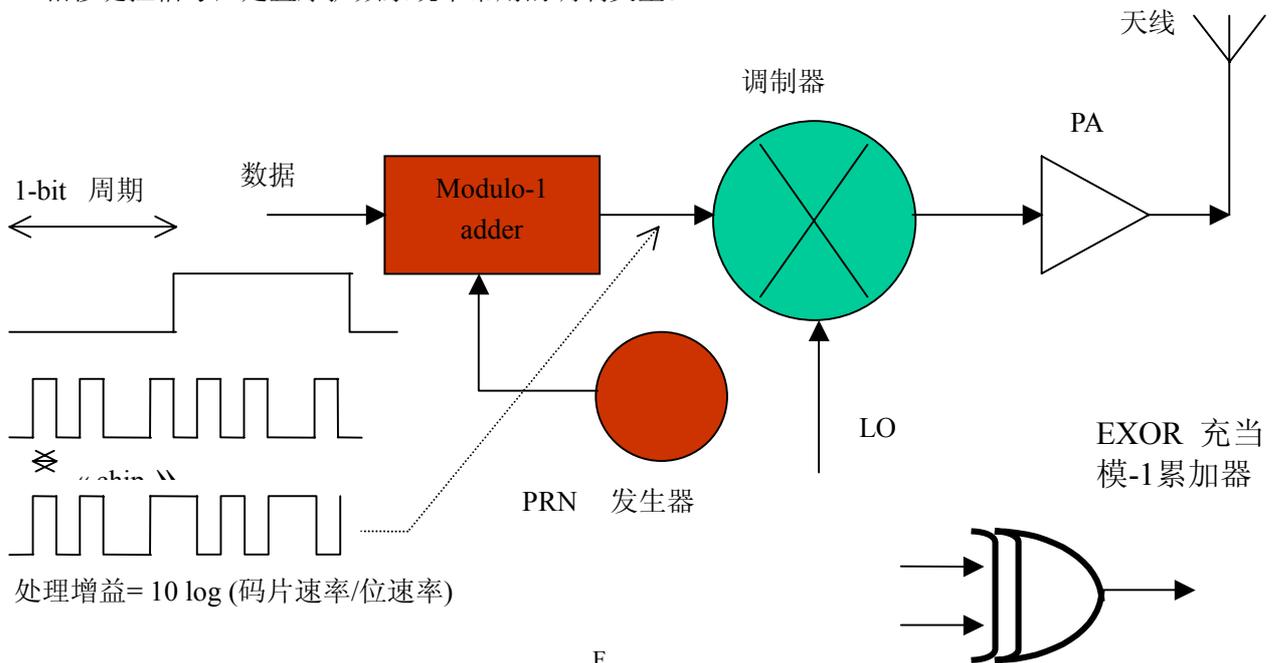
根据伪随机码插入通信信道的位置不同可以得到以下几种扩频调制方式：



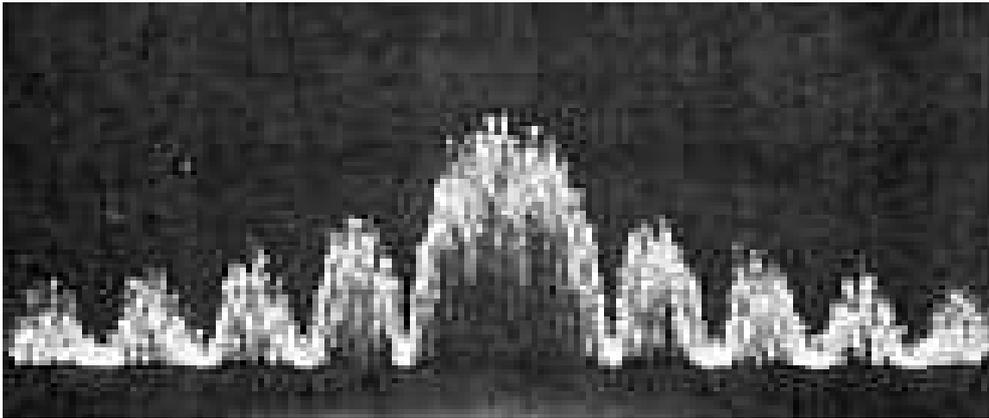
如果在数据上直接加入伪随机序列码，则可得到直序扩频（DSSS），在实际应用中，伪随机序列与通信信号相乘，产生完全被伪随机码“打乱”了的数据。如果伪随机码作用在载波频率上，我们得到跳频扩频（FHSS）。如果伪随机码作用于本振端，FHSS 伪随机码迫使载波按照伪随机序列改变或跳变。如果用伪随机序列控制发射信号的开或关，则可得到时间跳变的扩频技术（THSS）。也可以综合上述技术形成混合扩频技术。比如象 DSSS+FHSS。DSSS 和 FHSS 是现在最常用的两种技术。

直序扩频（DSSS）

在这种技术中，伪随机码直接加入载波调制器的数据上。调制器似乎具有更大的比特率，由伪随机序列的码片速率有关。用这样一个码序列调制射频载波的结果是产生一个中心在载波频率、频谱为 $(\sin x)/x$ 的直序调制扩展频谱。频谱主瓣（零点至零点）的带宽是调制码时钟速率的两倍，旁瓣带宽等于调制码时钟速率。下图是直序扩频信号的典型范例。直序扩频频谱形状上发生一些改变，与实际采用的载波和数字调制方法有关。下面是一个二相移键控信号，是直序扩频系统中常用的调制类型。

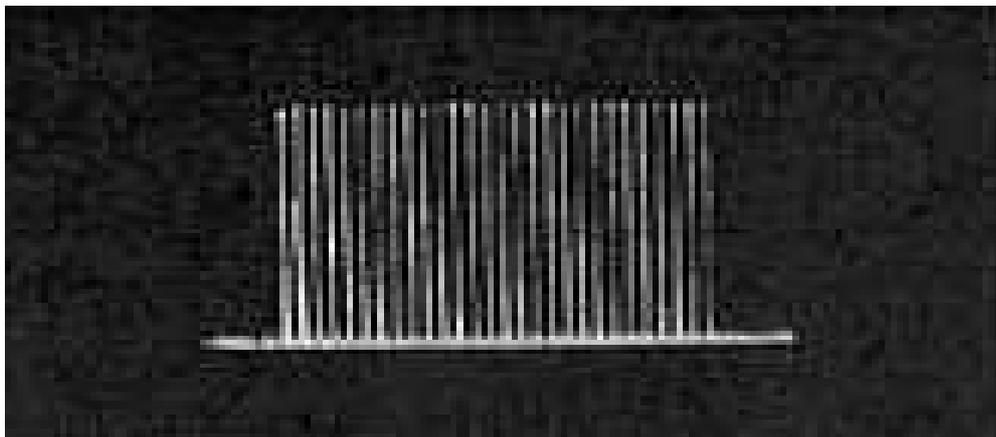
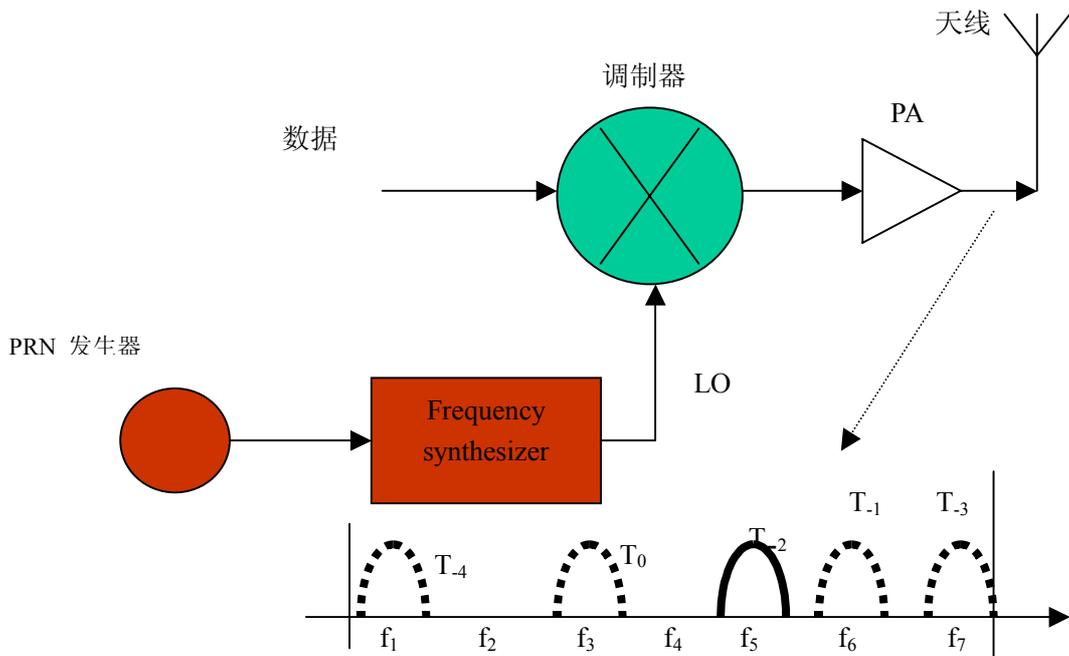


下图是直序扩频信号的频谱分析图，注意：原始信号（未扩频）仅占中心主瓣的一半。

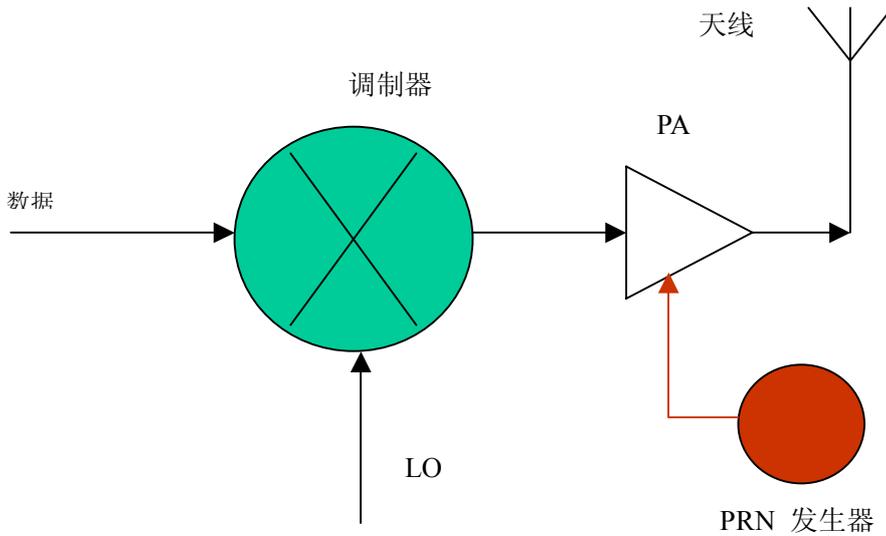


跳频扩频技术 (FHSS)

顾名思义，FHSS 中载波在一个很宽的频带上按照伪随机码的定义从一个频率跳变到另一个频率。跳变速率由原始信息的数据速率决定，我们能够识别出快速跳频 (FFHSS) 和慢速跳频 (LFHSS)。后者 (最通用) 允许几个连续的数据位调制同一频率。另一方面，FFHSS 是在每个数字位内多次跳频。跳频信号的发射频谱同直序扩频有很大差别，跳频输出在整个频带上是平坦的 (如下图)。跳频信号的带宽是频率间隙的 N 倍， N 是每个跳变信道的带宽。



时跳变扩频技术 (THSS)



时跳变扩频技术利用伪随机序列控制 PA 的通/断，该项技术到目前为止没有大的突破。

结论

构成一个完整的扩频通信链路需要运用各种先进的技术和工艺：射频天线，大功率、高效率的功放，低噪声、高线性的 LNA，高集成度收发信机，高分辨率的 ADC 和 DAC，高速、低功耗数字信号处理器 (DSP) 等。设计者和制造商之间即相互竞争、又精诚合作，最终使扩频系统得以实现。

最难以实现的电路是接收通道，特别是对 DSSS 的解扩，因为接收端必须能够重新恢复原始信息，并且做到实时同步。码的识别也称为相关运算，它是以数字域实现的，需要进行快速的、大量的二进制加法和乘法运算。到目前为止，接收机设计中最复杂的问题是同步问题。与扩频通信的其它技术相比，发展同步技术花费了更多的时间、金钱，也消耗了更多的人力、物力。

目前，能够解决同步问题的方法有许多种，大多数方案需要大量的分立元件。DSP 与 ASIC 的出现为其带来了重大突破。DSP 提供高速的数学运算能力，在对扩频信号划分后进行分析、同步和去相关运算。借助于超大规模集成电路技术，ASIC 降低了系统成本，并通过创建基本模块架构使其适合于多种应用。