



LoRa 扩频技术

LoRa 调制属于扩频调制,它将低数据速率比特流编码调制到相对较宽的调制带宽上。调制宽度与实际数据速率之间没有直接关系,在不改变频谱形状的情况下,数据速率可以在很宽的范围内改变。不同于传统的直接扩频调制(使用 BPSK 或 QAM 调制作为基本调制),LoRa 调制逻辑上是恒定包络,所以可以令放大器工作在饱和状态(高效率状态),使放大器的工作效率最高,而不像其他非恒包络调制,放大器要工作在线性区域。对比传统电子设备使用中频信号与锁相环混频后的高频信号接入功率放大器的架构,LoRa 的硬件结构简单很多。

本章介绍 LoRa 扩频调制理论和 LoRa 的调制参数,LoRa 信号从数据流变为 LoRa 扩频信号,再从射频信号通过解调变为需要数据的全过程。本章还介绍 LoRa 计算工具以及在应用中如何计算 LoRa 的关键参数。最后的小节是 LoRa 发射数据的一个编码过程实例,对 LoRa 调制有兴趣的读者不要错过。

3.1 LoRa 调制解调原理

LoRa 的优势是由自身的调制解调特性决定的,其难点和专利所在为接收机的解调过程,再准确一点说,LoRa 的数字解调算法是最核心的部分。2.2 节介绍了多种扩频方法,但并非使用了扩频技术其灵敏度就会大幅增加,也不是处理增益越高的系统灵敏度越高,而是与系统的调制解调机制相关。这也是 LoRa 调制技术区别于其他扩频技术的优势体现。

3.1.1 LoRa 调制理论

在研究 LoRa 调制理论前需要对一些基础参数的概念进行解释:

- SF: 扩频因子,对码片数量取对数后的数字;
- CR: 编码速率,有效编码率为 $4/(4+CR)$;
- BW: 调制带宽,当前 LoRa 物理层支持的带宽范围为 7.8~500kHz;
- NF: 无线电噪声系数(单位: dB)。



1. LoRa 调制链路

图 3-1 中的 LoRa 调制链路由五部分组成,分别是纠错编码器、交织器、扩频序列产生器、笛卡儿极坐标转换器、Delta-sigma 调制器。

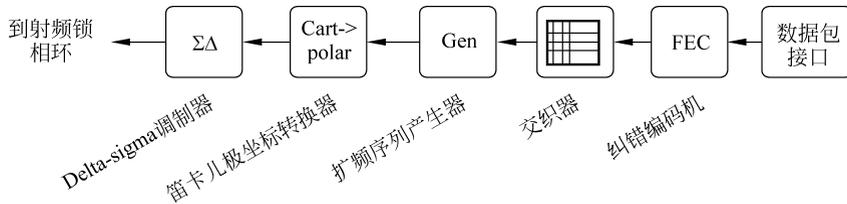


图 3-1 LoRa 调制框图

1) 纠错编码器

如图 3-1 所示,当一组数据[用户的有效载荷(Payload)]被推入数据包接口(Packet Interface)时,调制过程开始。调制器通过纠错编码器将前向纠错编码(Forward Error Correction,FEC)添加到这些字节中。

这些有效载荷数据每一字节首先分成半字节(4 位一组)。然后,根据编码速率配置,在 1~4 冗余纠错位之间选择并追加到每个半字节。调制器编码速率通过 CR 寄存器进行设置,表 3-1 为前向纠错编码配置表。

表 3-1 前向纠错编码配置表

编 码 率	循环编码的 CR (有用位数/总位数)	开 销 率
1	4/5	1.25
2	4/6	1.5
3	4/7	1.75
4	4/8	2

2) 交织器

通过纠错编码后,产生的 $(4+CR)$ 比特段,随后被存储到交织器的存储阵列中。交织器(Interleaver)有 $(4+CR)$ 列和 SF 行。一旦交织器满了,它的内容将编码到码元上。每个码元都带有 SF 位。因此,交织器内有 $(4+CR) \times SF$ 比特,独立于扩频因子 SF 被编码到 $4+CR$ 码元上。

这里举一个例子帮助读者理解交织器。假设此时 $CR=1, SF=7$,其交织器为 7 行、5 列。需要传输的数据流为: 00000001001000110100010101100111。先将这些比特流分为 4b 一组($b_1/b_2/b_3/b_4$): 0000; 0001; 0010; 0011; 0100; 0101; 0110; 0111; 对上述数据增加 1b 校验位($b_1/b_2/b_3/b_4/C$)后为: 00000; 00011; 00101; 00110; 01001; 01010; 01100; 01111; 再将上述数字填入交织器的存储阵列中。表 3-2 所示为交织器存储阵列数据模拟表,表中共有 7 行、5 列,可以放置 35b 的数据。

表 3-2 交织器存储阵列数据模拟表

$(4+CR) \times SF$	Symbol 1	Symbol 2	Symbol 3	Symbol 4	Symbol 5
	1	2	3	4	CR
1	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X	X
4	X	X	X	X	X
5	X	X	X	X	X
6	X	X	X	X	X
7	X	X	X	X	X

交织器存储阵列中的数据放置是通过一定的映射关系实现的。如图 3-2 所示,为数据与码元的交织映射关系示意图,可以看到 35 位的数据按照一定的映射关系被塞入 5 个码元中。

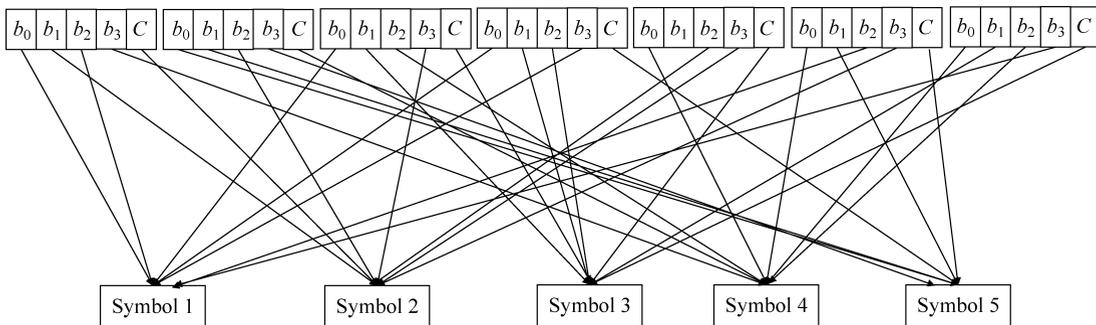


图 3-2 交织映射示意图

当 35b 数据进入交织器的存储阵列后,交织器存储满了,下一组数据($b_1/b_2/b_3/b_4/C$)需要填入下一个交织器中。

3) 扩频序列产生器

每个码元都由 2^{SF} 个码片组成。码片速率 chip-rate 等于调制带宽 BW。因此,码元(symbol)的持续时间为

$$T_{\text{symp}} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (3-1)$$

则无限长有效载荷(Payload)的有效数据速率

$$DR = \frac{4SF \cdot BW}{(4 + CR)2^{SF}} \quad (3-2)$$

每个包前面都有一个前导码。前导码的目的是向无线链路另一端的接收器提供具有特性的可检测序列,以确定频率和定时同步。

前导码由一系列未经调制的码元组成,其后是特定结束标记。前导码结束标记是一种

不会在正常载荷数据扩频调制中出现的特殊标记(特殊标记为下降频率码元)。前导码结束标记的长度为 4.25 个码元。初始未调制码元序列必须至少有 6 个码元,但可以任意延长而不影响其性能。

因此,前导码长度为 $(N + 4.25)$ 个 T_{symp} (码元周期时长),其中 N 是未调制码元的数目,最小前导码长度为 $10.25T_{\text{symp}}$ 。

4) 坐标转换、Delta-sigma 调制输出

图 3-1 所示扩频序列发生器(Spreading Sequence Generator)的输出是一个具有恒定包络的复杂采样流。利用笛卡尔极坐标变换器提取这些复频率的相位信息。相位分量被区分,从而产生瞬时频率调制,该瞬时频率调制被送到 Delta-sigma 调制器。

调制器的数字输出驱动锁相环的反馈分频器。LoRa 调制器相干调制无线电载波的相位,而不是幅度。最后连接功率放大器和天线将 LoRa 信号发送出去。

由此产生的无线电调制频谱看起来非常像平顶 OFDM 频谱。图 3-3 显示 125kHz 调制带宽的无线电发射频谱,该 LoRa 信号在邻道的抑制为 -33.9dB ,隔道的抑制为 -49.3dB 。

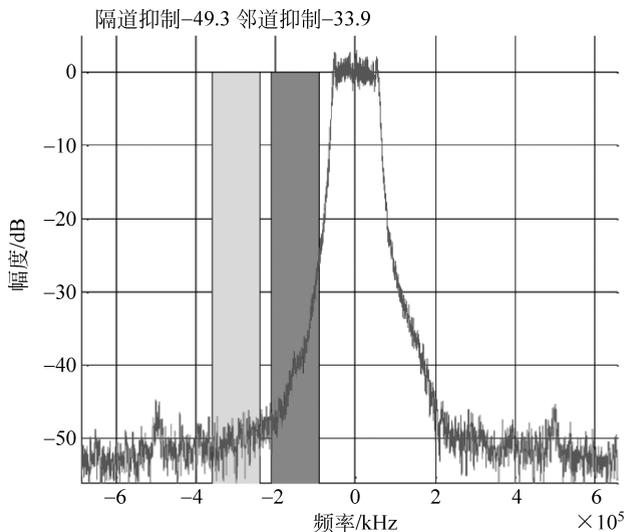


图 3-3 LoRa 125kHz 调制带宽信号

2. LoRa 解调链路

图 3-4 中的 LoRa 解调链路由多部分组成,分别是前向数字抽取滤波器、中频混频器、信道滤波器、软解映射器、解交织器、纠错解码器、扩频序列产生器。

经过下变频的 LoRa 射频信号,再经过 I/Q 采样后进入解调路径。解调路径与传统的解调电路一样从数字抽取滤波器开始,将来自 ADC 的高采样率流转换为高精度、低速率的样本流。中频混频器通过将样本流乘以复指数信号来执行复频率转换。这样做的目的是使系统能够利用可编程的低中频频率,避免出现通用无线电接收机中的直流偏置问题。

信道滤波器是 64 抽头的 FIR 滤波器,负责消除多余的带外信号。在频率偏移为 $\pm BW$

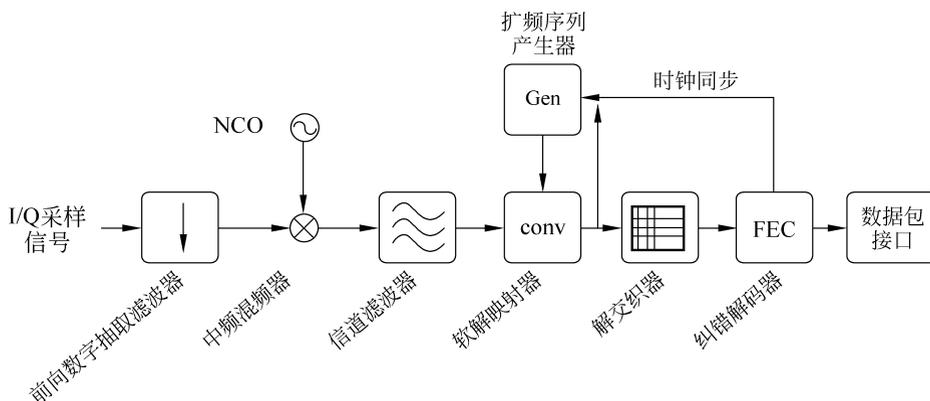


图 3-4 LoRa 解调链路框图

时,滤波器衰减大于 70dB。

信道滤波器的输出与发射机中使用的扩频序列做复共轭卷积。软解映射器解调的数据被推入解交织器,其顺序与发送器在编码期间读取的顺序完全相同。

一旦解交织器内数据填满,纠错解码器将对其进行处理。所使用的分组错误码是一种广义的软汉明码。

纠错解码器完成数据纠错后,将所有数据重新拼接发向数据包接口。

LoRa 解调链路中使用了软解码器配合 FEC 编码特点可以实现很好的纠错能力,解调中的数据处理采用与原有扩频序列复共轭卷积的方式,从而实现滤除非相干的干扰信号。

3. LoRa 信噪比 E_b/N_0 分析

表 3-3 给出了实现不同 LoRa 扩频因子解调所需的带内信号与干扰和噪声比(Signal to Noise+Interferer Ratio, SNIR),测试条件为编码率 4/5,包长度 32B,误包率 10%。

表 3-3 LoRa 扩频信号与干扰和噪声比关系表

SF	2^{SF} 码片数量	SNIR/dB	SF	2^{SF} 码片数量	SNIR/dB
5	32	-4	9	512	-14.0
6	64	-6.5	10	1024	-16.5
7	128	-9.0	11	2048	-19.0
8	256	-11.5	12	4096	-21.5

通过表 3-3 可以导出不同扩频因子在固定误包率下的 E_b/N_0 (每比特信噪比)。根据 2.2.3 小节中香农定理公式变形,用频带换取信噪比,将扩频和冗余因素去除,只考虑 1b 信号强度与噪声的关系。在不考虑纠错校验位时,对于给定的 SF,相应的 E_b/N_0 为

$$\frac{E_b}{N_0} = \text{SNIR} - 10\lg\left(\frac{\text{SF}}{2^{\text{SF}}}\right) \quad (3-3)$$

上述计算中只是对 LoRa 调制特性进行分析,未对纠错码的编码增益进行计算。在一

定的信噪比下,合理的纠错码能够有效地减小系统误码率。

【例 3-1】 计算误包率 10%, SF=12 时的极限 1b 信噪比 E_b/N_0 。

解: 查表 3-3, SF=12 时 SNIR=-21.5dB, 将 SF=12, SNIR=-21.5 代入式(3-3), 得

$$\frac{E_b}{N_0} = -21.5\text{dB} - 10\lg\left(\frac{12}{2^{12}}\right) = 3.8\text{dB}$$

表 3-4 给出了 LoRa 调制中不同扩频因子在几种误比特率下的极限 E_b/N_0 , 该数据源于笔者的实际测试。实际场景中常使用误比特率为 10^{-4} 时所对应的 E_b/N_0 。

表 3-4 几种误比特率下的不同扩频因子的极限 E_b/N_0

SF	$(E_b/N_0)/\text{dB}$		
	误比特率= 10^{-3}	误比特率= 10^{-4}	误比特率= 10^{-5}
12	2.8	3.6	4.5
11	2.9	3.8	4.7
10	3.1	4.0	4.9
9	3.4	4.2	5.2
8	3.7	4.5	5.5
7	4.0	4.8	5.9
6	4.3	5.4	6.4
5	4.9	6.0	6.9

如表 3-4 所示, 在相同的 E_b/N_0 条件下, 采用更高的扩频因子可以获得更好的误码率表现。当采用前向纠错编码后, 表 3-4 中所需的极限 E_b/N_0 可以再降低(编码增益可以降低系统误码率)。

细心的读者可能注意到表 3-3 中, 每当扩频因子加 1, 所需的 LoRa 调制 SNIR 只提高了 2.5dB, 而不是通常预期的 3.0dB。这是因为当从 SF 切换到 SF+1 时, 有效数据率不是减半而是乘以 $\frac{\text{SF}+1}{2\text{SF}}$ 。因此, 相邻两个扩频因子的灵敏度差为

$$\text{sensi}_{\text{SF}+1} = \text{sensi}_{\text{SF}} + 10\lg\left(\frac{\text{SF}+1}{2\text{SF}}\right) \quad (3-4)$$

通常, 当从 SF7 到 SF8 时, 根据式(3-4), 我们期望最佳扩频系统将其灵敏度提高为

$$\text{sensi}_{\text{SF}7} \sim \text{sensi}_{\text{SF}8} = -10\lg\left(\frac{7+1}{2 \times 7}\right) = 2.4\text{dB}$$

这个结果确实也是实际测量值。

4. LoRa 的接收灵敏度

1) 白噪声下的 LoRa 灵敏度

根据表 3-3, 如果知道 LoRa 接收机的噪声系数(NF), 可以很容易地预测 LoRa 系统的灵敏度。

无线电噪声系数(通常以分贝表示)对应于无线电接收器在不可避免的热噪声之上所加

的噪声量。理想的射频噪声系数为 0dB。在 50Ω 的负载下,热噪声密度为 -174dBm/Hz。因此等效无线电噪声为 -174dBm/Hz+NF。

在这种情况下,对于给定的 SF,LoRa 接收器的灵敏度为

$$\text{sensi}_{\text{SF}} = -174 + \text{NF} + 10\lg\text{BW} + \text{SNIR}_{\text{SF}} \quad (3-5)$$

例如,优化后的 LoRa 网关接收机的噪声系数为 2dB。对于 125kHz 的调制带宽,使用 SF=12,代入式(3-5)后的灵敏度为

$$\text{sensi}_{12} = -174 + 2 + 10\lg 125000 - 21.5 = -142.5$$

这确实是在 SF=12 下测得的灵敏度!

图 3-5 为 SX1302 网关工作在 474.8MHz,载荷=32B 情况下的灵敏度曲线。可以看出 1%误包率比 10%误包率要求严格,其灵敏度约相差 1.5dB。不同的 SF 曲线之间灵敏度相差约 2.5dB。

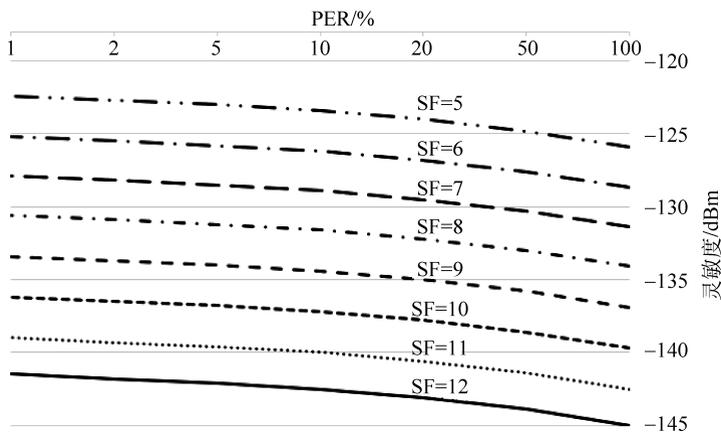


图 3-5 SX1302 网关在不同误包率下的灵敏度

上述测试中如果采用更大载荷进行测试,如选择载荷=64B,则所有灵敏度都会略微变差。实际应用中选择 1%的误包率或 10%的误包率下的灵敏度作为系统的灵敏度。因为 LoRa 数据调制的特色,无法孤立地看误码率或误比特率,因此使用误包率的概念。

在实际应用中,像 SX1272 这样的低功耗终端芯片,外部匹配滤波电路和内部解调电路会引入 4~7dB 的系统噪声。

我们已知 LoRa 的调制方式已经接近物理极限,如果想要进一步提升 LoRa 的性能,只能在降低接收信道的噪声系数上下功夫了。

【例 3-2】 FSK 系统与 LoRa 系统灵敏度对比。若两个系统工作在同样的传输速率下,其灵敏度差别为多少? LoRa 的前向纠错为 4/5。假设 FSK 系统与 LoRa 系统前端噪声系数相同,都为 7dB。灵敏的定义为 1%误包率环境中的灵敏度,假设 LoRa 与 FSK 包长度一样。

解: 假定 LoRa 工作在 SF7, BW=125kHz,表 3-5 中 LoRa 终端节点在 1%误包率(包

长度 32B)下的 SNR 极限为 -7.5dB 。

$$DR_{\text{LoRa}} = \frac{4SF \times BW}{(4 + CR)2^{\text{SF}}} = \frac{4 \times 7 \times 125\text{kHz}}{5 \times 2^7} = 5.47\text{kb/s}$$

LoRa 工作在 $SF=7, BW=125\text{kHz}$ 时 1% 误包率情况下的 LoRa 解调器的 SNR = -7.5dB 。

$$\text{sensi}_{\text{LoRa}} = -174 + 7 + 10\lg 125000 - 7.5 = -123.5$$

FSK 的误包率需要转换为误码率,假设 FSK 数据包内含有 $n=32\text{B} \times 8=256\text{b}$ 。

根据比特误码率和包误码率公式

$$P_b = 1 - (1 - P_e)^n \quad (3-6)$$

式中, P_b 为误包率; P_e 为比特误码率, n 为每包长度中的比特个数。

可得

$$P_e = 1 - \sqrt[n]{1 - P_b} = 1 - \sqrt[256]{1 - 0.01} = 3.9 \times 10^{-5}$$

代入 2.1.4 小节 FSK 相干及解调误码率公式计算,得到 3.9×10^{-5} 误码率时的信噪比要求约为 12dB,则 $\text{SNIR}_{\text{FSK}}=12\text{dB}$ 。要达到相同的有效数据率,带有冗余(帧头、校验等)的 FSK 通信速率约为 6.5kb/s,此时检测带宽约为通信速率的 1.5 倍。

$$\text{sensi}_{\text{FSK}} = -174 + 7 + 10\lg(6500 \times 1.5) + 12 = -115.1$$

从上述比较可得

$$\text{sensi}_{\text{FSK}} - \text{sensi}_{\text{LoRa}} = -115.1 - (-123.5) = 8.4$$

在同样数据速率下 LoRa 比 FSK 灵敏度好 8.4dB。

【例 3-3】 已知 NB-IoT 上行信道 15kHz,采用重传的方式,重传次数 N 的最大值为 128,此时对应基站的极限 SNIR 为 -11.8dB ,基站的噪声系数 $NF=3$,求 NB-IoT 基站的灵敏度以及每比特数据的信噪比 E_b/N_0 极限。

解: 根据式(3-5),NB-IoT 灵敏度为

$$\begin{aligned} \text{sensi}_{\text{NB}_{\min}} &= -174 + NF + 10\lg BW + \text{SNIR}_{\text{NB}} \\ &= -174 + 3 + 10\lg 15000 - 11.8 = -141\text{dBm} \end{aligned}$$

根据式(3-3)可得 1b 数据的信噪比 E_b/N_0 极限为

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{NB}} = \text{SNIR}_{\text{NB}} - 10\lg\left(\frac{1}{N}\right) = -11.8 - 10\lg\left(\frac{1}{128}\right) = 9.3\text{dB}$$

分析: 从 E_b/N_0 极限对比可知 LoRa 调制(例 3-1 中的 LoRa 在 $SF=12$ 时, E_b/N_0 极限为 3.8dB)比 NB-IoT 好 5.5dB(9.3dB-3.8dB)左右。从终端设备分析,在不考虑 NB-IoT 与 LoRa 工作频率不同的前提下,NB-IoT 设备需要发射 LoRa 设备的约 3 倍(5.5dB)功率才能实现同样的工作距离。实际上也是如此,NB-IoT 设备输出功率为 23dBm,LoRa 设备输出功率为 17dBm,两者相差 5dB 左右。

2) 干扰噪声下的 LoRa 灵敏度

上述讨论的灵敏度均为只考虑白噪声而没有外界干扰的情况。当附近存在一定强度噪声时,LoRa 接收机可以解调的最小信号强度与接收的信噪比相关。根据 LoRa 信号 SNIR

的表格所示,如果此时接收机附近的带内噪声强度为 P_N ($P_N > \text{sensi}_{\text{LoRa}} + \text{SNIR}$),则此时的接收机可以解调的最小信号为

$$P_{\min} = P_N + \text{SNIR} \quad (3-7)$$

式中不同扩频因子对应的 SNIR 不同。

当 $P_N < \text{sensi}_{\text{LoRa}} - \text{SNIR}$ 时,接收机可以解调的最小信号为 $P_{\min} = \text{sensi}_{\text{LoRa}}$ 。

因此 LoRa 接收机会输出两个接收参数,分别是信号强度(RSSI)和信噪比(SNR)来说明接收信号的质量情况。RSSI 说明接收到信号的强度,而 SNR 说明信号的质量。LoRa 接收机可以解调的最小信号强度是由 RSSI 和 SNR 中相对较差的一个决定的。

【例 3-4】 一个 LoRa 系统接收机附近有 -100dBm 的带内噪声干扰,计算此时接收机可解调的最小信号强度是多少。

解: 由于 LoRa 信号在 $\text{SF}=12$ 时有最好的抗噪特性,查表 3-5 得到 $\text{SF}=12$ 时的 SNIR 为 -20dB ,已知此时接收机的灵敏度为 -142.5dBm 。

那么系统总噪声要求最大不能超过 $-142.5 - (-20) = -122.5\text{dBm}$ 。

而此时的带内噪声由两部分组成,分别是干扰噪声和热噪声。 $P_N = P_i + P_n$,其中 $P_i = -100\text{dBm}$, $P_n = -174 + 10\lg 125000 = -123\text{dBm}$, $P_i \gg P_n$ 。

$$P_N = P_i + P_n = 10\lg(10^{-\frac{100}{10}} + 10^{-\frac{123}{10}}) = -99.98\text{dBm}$$

由于 $P_N > -122.5\text{dBm}$,则系统可解调的最小信号 P_{\min} 为

$$P_{\min} = P_N + \text{SNIR} = -99.98 - 20 = -119.98\text{dBm}$$

本例题中,干扰噪声比热噪声大得多,可以近似认为 $P_N = P_i$;当干扰噪声与热噪声相当时,必须通过 $P_N = P_i + P_n$ 计算。

3.1.2 LoRa 调制解调器模块详解

1. 调制参数

对于一个给定的应用,在 LoRa 调制方式下,可以通过给出的 4 个参数对其性能进行优化,以便在链路预算,抗干扰性能,频谱占用和传输速率之间做出平衡。这 4 个参数为调制带宽(BW)、扩频因子(SF)、编码率(CR)和低速率优化(LDRO)。

1) 扩频因子

LoRa 扩频调制是通过把有效载荷信息中每比特数据用多位码片信息表示来实现的。由于不同的扩频因子之间两两正交,所以在一组收发链路中,扩频因子必须提前预知。除此之外,还要注意在接收机输入端所需的信噪比(SNR)。表 3-5 为 1% 误包率下,LoRa 终端节点芯片解调所需的最小信噪比。

表 3-5 SX1262 扩频因子范围及 SNR

扩频因子(SF)	5	6	7	8	9	10	11	12
2^{SF} (码片/码元)	32	64	128	256	512	1024	2048	4096
典型的 LoRa 解调器的 SNR/dB	-2.5	-5	-7.5	-10	-12.5	-15	-17.5	-20



视频讲解

在 LoRa 接收机中,由于能够接收负信噪比的信号,因此增加了接收机灵敏度,链路预算以及覆盖距离。较高的扩频因子提供更好的接收机灵敏度,但是以更长的空中传输时间为代价。

2) 带宽

增加信号带宽可以提高有效载荷的传输速率,但是在减小发射时间的同时也带来了接收机灵敏度的下降。

如图 3-6 所示,在 LoRa 模式下,带宽(BW) 可以用软件设置,位于中心频率(f_{RF})附近。

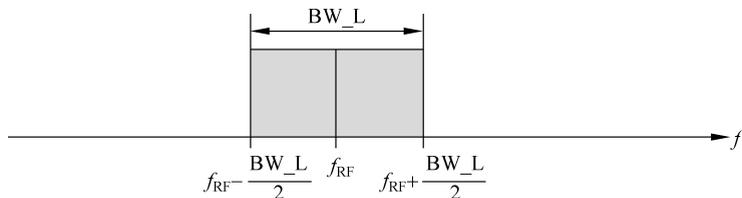


图 3-6 LoRa 信号带宽

很多国家对占用带宽都有限制。LoRa 调制带宽指的是双边带带宽。如表 3-6 所示,LoRa 可选的带宽范围非常广,共有 10 种不同的带宽可选。

表 3-6 LoRa 模式下的信号带宽设置

信号带宽	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
BW/kHz	7.81	10.42	15.63	20.83	31.25	41.67	62.5	125	250	500

对于小于或等于 250kHz 的带宽(BW),接收机需要做二次变频。第一次变频为高频变到低中频,第二次变频为中低频变到基带频率,以便基带用作解调。当使用 500kHz 带宽时,在 RF 链路内一次性直接变频至零中频(zero-IF)。

3) 前向纠错编码率

为了进一步提高链路的鲁棒性,LoRa 调制解调器采用循环误差编码来执行前向误差检测和校正。

前向纠错(FEC)对于提高存在干扰的链路的可靠性特别有效。因此,可以改变编码速率和抗干扰的鲁棒性来应对不同的信道条件。在发射机端选择的编码速率通过包头(当存在时)传递给接收机。

更高的编码率提供了更好的抗扰性,但需要更长的传输时间。如表 3-1 所示为前向纠错编码率表。在正常情况下,4/5 的因子提供了最佳的折中;在强干扰的情况下,可以使用更高的编码率。错误校正码不需要被接收器预先知道,因为它被编码在包头部分。

4) 低数据率优化

对于低的数据率(通常是高的扩频因子或低的带宽)和一个需要在空中持续传输几秒的有效载荷,此时可以打开低速率优化(LDRO)。这样每个码元对应的比特数减少为 $SF = 2$

(详见 3.1.2 小节的 LoRa 空中时间),以便接收机更好地追踪 LoRa 信号。根据有效载荷大小,当 LoRa 的码元时间等于或大于 16.38ms 时推荐使用低数据率优化功能。

在 LoRa 调制模式下应该使包传输时间内的频率漂移降至最小并且低于 Freq_drift_max 。

$$\text{Freq_drift_max} = \frac{\text{BW}}{3 \times 2^{\text{SF}}} \quad (3-8)$$

在低速模式下 $\text{LowDataRateOptimize}$ 配置为 0x01,则可以使包传输时间内的频率漂移的要求放松至 $16 \times \text{Freq_drift_max}$ 。

$$\text{Freq_drift_max} = \frac{\text{BW}}{3 \times 2^{\text{SF}}} 16 \quad (3-9)$$

5) LoRa 发射的参数关系

根据所知的关键参数,LoRa 码元率被定义为

$$R_s = \frac{\text{BW}}{2^{\text{SF}}} \quad (3-10)$$

式中,BW 为带宽;SF 为扩频因子。传输的信号是一个恒定包络的信号,等效于每 1Hz 带宽上每秒发送一个码片。

2. LoRa 帧结构

LoRa 调制解调器使用显性和隐性两种类型的数据包格式。显性包包含一个短消息头,其包含了字节数、编码率和包中是否使用了 CRC 的信息,其包结构的格式如图 3-7 所示。



图 3-7 LoRa 包格式

LoRa 数据包开始于一个前导序列,该序列用于使接收机与输入信号同步。默认情况下,该前导通常被配置为一个包含 12 个码元长的序列。这是一个可变量,因此可以扩展前导码长度,例如为了减少接收密集型应用中的接收机占空比。一旦考虑了固定的前导码元(4.25 个码元,为了方便计作 4 个码元),所传输的前导码长度可以为 10~65535 个码元数。

接收机会周期性地重启前导检测操作。出于这个原因,前导序列长度应该配置为与发射机前导序列相同的长度。如果不知道前导序列长度或者其是可变的情况下,应该在接收端将前导序列的长度设置为最大。

前导序列后面是一个包头,其包含了后续的有效载荷的信息。有效载荷字段长度可变,最后可以选择附加 CRC 校验。

根据所选的操作模式,可以使用两种类型的包头。

1) 显性包头模式

显性包头是默认的操作模式。这时包头提供了如下有效载荷的信息：

- 以字节计算的有效载荷长度；
- 前向纠错编码率；
- 对有效载荷进行校验的可选的 16 位 CRC。

包头以最大纠错码(4/8)传输。同时它也有自己的校验码,以便允许接收器丢弃无效的包头。

2) 隐性包头模式

在某些情况下,有效载荷、编码率和 CRC 是固定的或预先知道的,这时可以通过使用隐性包头模式来减少传输时间。该模式中包头被删除。此时在收发两端中,有效载荷的长度、错误编码率和有效载荷校验 CRC 需要手动配置成相同的参数。在大量相同终端设备的应用中经常使用隐性包头,如大量数据格式相同的表计时上报数据可以采用隐性包头。

3. LoRa 空中时间

空中时间(ToA)可以通过以下的方程式获得：

$$ToA = \frac{2^{SF}}{BW} N_{symbol} \quad (3-11)$$

式中,SF 为扩频因子(5~12); BW 为带宽(kHz); ToA 为空中时间(ms); N_{symbol} 为码元数。

由于调制参数的不同,码元数的计算是不同的。

对于 SF=5 和 SF=6:

$$N_{symbol} = N_{symbol_preamble} + 6.25 + 8 + \text{ceil} \left(\frac{\max(8 \times N_{byte_payload} + N_{bit_CRC} - 4 \times SF + N_{symbol_header}, 0)}{4 \times SF} \right) \times (CR + 4) \quad (3-12)$$

对于其他的 SF:

$$N_{symbol} = N_{symbol_preamble} + 4.25 + 8 + \text{ceil} \left(\frac{\max(8 \times N_{byte_payload} + N_{bit_CRC} - 4 \times SF + 8 + N_{symbol_header}, 0)}{4 \times SF} \right) \times (CR + 4) \quad (3-13)$$

对低速率优化开启模式下的其他 SF:

$$N_{symbol} = N_{symbol_preamble} + 4.25 + 8 + \text{ceil} \left(\frac{\max(8 \times N_{byte_payload} + N_{bit_CRC} - 4 \times SF + 8 + N_{symbol_header}, 0)}{4 \times (SF - 2)} \right) \times (CR + 4) \quad (3-14)$$

上述式中参数设置如下:

- CRC 开启时, $N_{bit_CRC} = 16$,反之为 0;

- 显性包头模式时 $N_{\text{symbol_header}} = 20$, 隐性包头模式时为 0;
- CR 为 1、2、3 或 4, 分别对应于编码率 4/5、4/6、4/7 或 4/8。

关于空中飞行时间的详细计算会在第 8 章讲述。Semtech 网站上针对不同芯片有相应的 LoRa 计算器, 读者可以下载使用, 3.2.1 小节有 LoRa 计算器工具的使用讲解。

4. LoRa 信道状态检测(CAD)

对于扩频调制技术的应用, 由于有用信号可能位于接收机的噪声之下, 使得很难确定信道是否被占用。在这种情况下使用接收信号强度指示(RSSI)显然是行不通的。为了达到有效监测信道占用情况, 信道状态检测(CAD)功能被发明出来用于检测信道中是否有 LoRa 信号。

在芯片 SX126X 中, 信道状态检测是通过检测 LoRa 的前导或数据码元来实现的, 而前一代 SX127X 产品仅能通过检测 LoRa 的前导来实现该功能。

在 CAD 模式中, 芯片 SX1261/2 通过在用户选择的时间(由码元的数量确定)内扫描整个带宽, 通过返回的信道状态检测 IRQ 来判断通道内是否有 LoRa 信号。

信道状态检测所需要的时间取决于 LoRa 调制的参数设置。对于给定的配置(SF/BW), 典型的 CAD 检测时间可以选择为 1、2、4、8 或 16 个码元。一旦完成对指定码元数的监听持续时间, 接收机将在 RX 中再保持半个码元时间用于后续的测量和处理。

3.2 LoRa 计算器工具

在 3.1 节的学习中, 我们了解到了很多关于 LoRa 的核心参数, 以及如何配置一个 LoRa 包, 及码元长度, 空中飞行时间等参数。为了方便大家了解和使用 LoRa 技术并计算上述的参数, Semtech 公司开发了一套 LoRa 计算器。根据芯片类型不同分别是 SX126X、SX127X 和 SX128X 三款 LoRa 计算器。计算器内容大同小异, 都是基于芯片可以配置的参数进行选择, 从而自动计算出需要的参数。本计算器工具主要针对发射参数配置情况, 对于接收参数和功耗参数等, 计算工具中就没有涉及, 可以参考产品说明书。

3.2.1 LoRa 计算器讲解

图 3-8 所示为 SX1261 芯片配套使用的 LoRa 计算器工具。该 SX1261 LoRa 计算器有两个操作界面, 分别是 LoRa 模式和 GFSK 模式, 是因为该芯片同时支持这两种制式。现在的展示是 LoRa 操作界面, 单击 GFSK 可以切换到 GFSK 界面。本小节内容的重点是 LoRa 模式。

界面的左侧是 LoRa 参数输入部分。参数分为三组主要类型, 分别是 LoRa 模式设置(LoRa Modem Settings)、数据包配置(Packet Configuration)、射频设置(RF Settings)。这三组参数基本包含了 LoRa 发射数据包需要的主要参数。

1. LoRa 调制参数

Spreading Factor(SF, 扩频因子): 可以设置 5~12 这几种配置(如果使用 SX127X 计算器只支持 6~12 的配置, 因为 SX127X 芯片不支持 SF=5)。



视频讲解

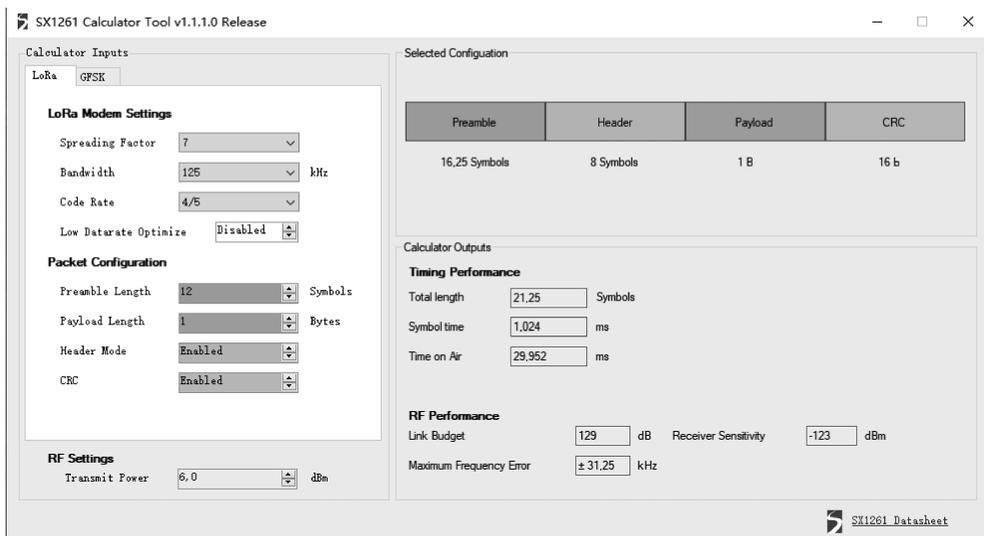


图 3-8 SX1261 LoRa 计算器截图

Bandwidth(BW,带宽): 支持 7.81,10.42,15.63,20.83,31.25,41.67,62.5,125,250,500kHz 这些带宽参数配置。一般常使用 125kHz,这是 LoRaWAN 中默认信道带宽配置。

Code Rate(CR,编码率): 纠错编码的使用有四种配置,分别为 4/5、4/6、4/7、4/8。其意义是每 4b 载荷数据需要在通信纠错编码中使用多比特表示,如 4/5 表示需要 5b 表示原来的 4b,说明额外增加了 1b 纠错编码信息。在 LoRa 芯片配置中常使用额外 1b 的纠错编码。一条通信数据中使用的纠错编码比例越高,这条数据在传输中的误包率就越低。在传输中,由于噪声影响,每一比特数据都有可能被解调错误,当有少量数据解调错误时有一定概率可以通过纠错码还原。LoRa 解调是根据整个码元来解调的,如果出错会使整个码元出错,不过数据调制发射前采用了交织编码,纠错码与数据信息已经被分配到不同的码元中传输,不会因为一个码元错误而导致这一组数据无法还原。使用纠错码比率越高,纠错能力越强,与此同时其包内冗余数据就越多,占用了空中飞行时间。在实际的 LoRa 应用中,4/5 的配置方式是纠错能力和包长度平衡的最佳选择,也是 LoRaWAN 标准中的常用配置。

Low Datarate Optimize(低速率优化): 采用低速率优化后可以使低速率的数据传输鲁棒性增强,但是带来的缺点是增加了信号的飞行时间。3.1.2 小节的公式计算中有专门针对低速率优化的计算。低速率优化还可以增强对抗多普勒频移,以及增强长包信号在一次通信数据包内由于多径衰落等影响引起的频率漂移等。只有在低速率的 SF=11 和 SF=12 情况下才需要打开频率偏移功能。

上述的配置的 LoRa 调制模式为物理层配置,是发射一个 LoRa 数据包最基本的设置。对应的接收机必须开启与发射机参数完全一致的配置才可以进行数据接收和解调。数据包配置部分的参数属于链路层配置。

2. 数据包配置

Preamble Length(前导长度): 前导码的长度具有多样性,针对一些异步唤醒的应用,需要超长的前导码,有的前导码长接近 1s 或更长。一般应用中经常配置的前导码长度为 8 个码元。

Payload Length(载荷长度): 此长度是根据客户需求而定的,最小是 1B,最大长度需要满足各国家/地区无线电规范,太长会导致空中飞行时间过长而违反规范。需要注意的是,每增加 1B 长度的载荷,其空中飞行时间不会连续增加,而是增加一定数量的载荷后一次性地增加飞行时间。这是因为载荷数据需要先经过交织器的交织编码处理,而交织器有一定的数据容量。比如在 SF=10 的配置下,增加 1~5B 的载荷,需要发送的码元都需要额外增加 5 个。在纠错编码为 4/5 的配置下,交织器为 SF=10 行、CR+1=5 列,交织内有 50b 数据,其中 40b 为有效载荷,10b 为前向纠错编码。所以每 5B 的载荷数据需要 5 个码元来携带。

Header Mode(帧头模式)和 CRC(循环冗余校验)可以通过软件设置开启和关闭。

3. 射频参数配置

射频参数中可以设置其发射功率(Transmit Power),针对 SX126x 系列芯片,其输出功率在 -6~22dBm 可调,步进为 1dB。

4. 输出栏显示

在调整界面左侧的计算输入数据后,计数器工具右侧的数据会发生变化。右侧共有如下输出栏:

选定配置(Selected Configuration): 是根据左侧的数据包配置决定的。在配置好左侧的包结构参数后,右侧会自动生成实际可以发送的帧结构组合。

Calculator Outputs(计算输出)中有两部分,分别是 Timing Performance(时间性能参数)和 RF Performance(射频性能参数)。

1) 时间性能参数

Total length(整体包长度): 单位是码元,表示当前参数的数据包一共需要多少码元来调制发送。这个码元的数据是根据数据包配置和选择的扩频因子共同计算的结果。

Symbol time(码元时长): 码元的长度是由 LoRa 调制的特性决定的,由带宽和扩频因子参数决定。带宽越大,其码元时长越短;扩频因子越小,码元时长越短。LoRaWAN 的应用中常见的参数为 SF=7~SF=12, BW=125kHz,此时的码元时长为 1~32ms。为了工程中方便记忆, SF=7 的码元时长记为 1ms,其他扩频因子的时长都为 2 的指数关系。如 SF=12 比 SF=7 大 5,则时长为 2 的 5 次幂 32ms。通过码元时长还可以计算出一个非常关键的参数,等效数据速率(Data Rate, DR)可以采用式(3-2)计算。也可以通过码元时长计算出 DR,其中 DR 与 T_{symb} 关系公式为

$$DR = \frac{4SF}{T_{\text{symb}}(CR + 4)} \quad (3-15)$$

如常用的 SF=7、BW=125kHz 的传输数据速率为 5.5kb/s,将参数代入式(3-15)和式(3-2)都可以计算得出同样的结果 5.5kb/s。

Time on Air(空中时间): 整个包在空中飞行的时间,是由码元的时长及总共码元的数量决定的。在开启低速率优化模式下,其飞行时间会变长。请参照 3.1.2 小节中式(3-12)~式(3-14)。

2) 射频性能

Receiver Sensitivity(接收灵敏度): 芯片在当前的 LoRa 调制参数设置下的最小可以解调信号的强度(保证一定误码率),由扩频因子和带宽决定,是 LoRa 物理层解调参数。带宽越小、扩频因子越大,其灵敏度越好,表现为负数绝对值越大。比如常见的 $SF=7$ 、 $BW=125\text{kHz}$ 时的灵敏度为 -123dBm 。当使用超窄带,超远距离(如卫星通信)时,配置为 $SF=12$ 、 $BW=7.81\text{kHz}$,此时的灵敏度已经达到了惊人的 -149.1dBm 。在这种超窄带环境中有很好的灵敏度,但是代价是通信速率很低,就算发短数据包也要至少十几秒的时间。

Link Budget(链路预算): 收发链路之间可以保证稳定通信的最大传输损耗,链路预算等于发射功率减去灵敏度。电磁波在传输的过程中会有损耗,传输距离越远损耗就越大。增加链路预算有两种方法,分别是增大发射功率和提高灵敏度。在一般的系统中,由于各国家和地区对无线电的发射功率有严格要求(发射功率过大会占用带宽及覆盖干扰区域增大,影响他人使用),剩下提升传输距离的方式就只剩下提高灵敏度了。所以远距离应用可以选择更低的带宽和更大的扩频因子来影响接收灵敏度,从而影响链路预算增加通信距离。在 8.1.2 小节中,有关于设置不同灵敏度和工作距离的计算。

Maximum Frequency Error(最大频率误差): LoRa 由于采用扩频通信,对频率的敏感度很低,即使发射机和接收机之间带宽偏差 25%,依然可以实现通信。此参数是由 LoRa 调制参数带宽决定的。

3.2.2 LoRa 飞行时间计算

LoRa 计算器工具中飞行时间可以根据公式计算来验证。

【例 3-5】 采用 $SF=7$, $BW=125\text{kHz}$, $\text{Code rate}=4/5$; 关闭包头和 CRC, 前导长度为 12 个码元长度, 载荷为 2B。

解: 由于关闭包头和 CRC, 所以 $N_{\text{bit_CRC}}=0$, $N_{\text{symbol_hander}}=0$ 。此时根据式(3-1)计算:

$$T_{\text{symp}} = \frac{2^{\text{SF}}}{\text{BW}} = \frac{2^7}{125\text{kHz}} = 1.024\text{ms}$$

根据式(3-13)可得:

$$\begin{aligned} N_{\text{symbol}} &= N_{\text{symbol_preamble}} + 4.25 + 8 + \text{ceil} \\ &\quad \left(\frac{\max(8 \times N_{\text{byte_payload}} + N_{\text{bit_CRC}} - 4 \times \text{SF} + 8 + N_{\text{symbol_hander}}, 0)}{4\text{SF}} \right) \times (\text{CR} + 4) \\ &= 12 + 4.25 + 8 + \text{ceil} \left(\frac{\max(8 \times 2 + 0 - 4 \times 7 + 8 + 0, 0)}{4 \times 7} \right) \times (1 + 4) \\ &= 12 + 4.25 + 8 + \text{ceil} \left(\frac{\max(-4, 0)}{7} \right) \times 5 = 12 + 4.25 + 8 + 0 = 24.25 \end{aligned}$$

$$T_{\text{toA}} = T_{\text{symbol}} \times N_{\text{symbol}} = 1.024\text{ms} \times 24.25 = 24.832\text{ms}$$

LoRa 计算器工具的计算结果与上述数据相同,计算正确。

为了熟悉 LoRa 的主要参数,读者可以多动手操作此计算器工具。2.4GHz LoRa 128X 系列中还增加了 Fast LoRa 调制模式的工具,读者可以下载尝试。对于 LoRa 的深入理解最好通过手工计算的方式进行验证和学习。

3.3 LoRa 空口实际案例分析

在 3.1 节中,我们讲解了 LoRa 的调制解调原理,本节将通过实际的案例和图形使读者深入了解 LoRa 参数以及调制过程。

3.3.1 LoRa 码元调制编码

图 3-9 是一个 SF=7 的 LoRa 调制编码图,从图中可以看出码元、码片、数据速率、载荷数据之间的关系。

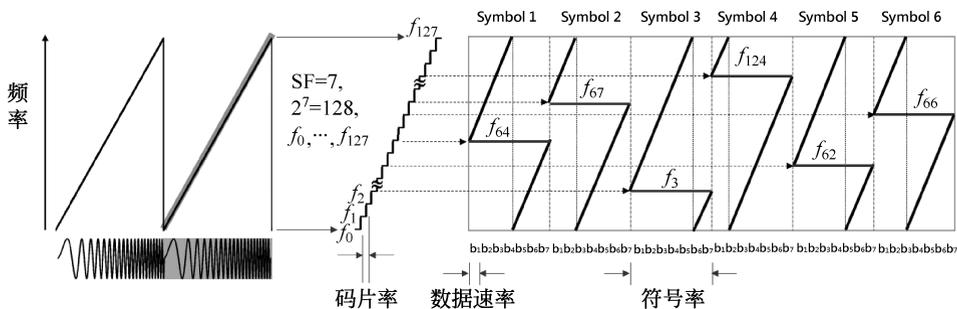


图 3-9 LoRa 调制编码图(见彩插)

图 3-9 中 SF=7,所以发送信号带宽切分为 128(即 $2^7 = 128$)个频率段的码片。假设该系统工作频率为 470MHz, BW = 250kHz,相邻码片间隔为 $250\text{kHz}/128 = 1.95\text{kHz}$,此时 $f_0 = 470\text{MHz}$, $f_1 = 470.00195\text{MHz}$, $f_2 = 470.0039\text{MHz}$, ..., $f_{127} = 470.24805\text{MHz}$ 。

从图 3-9 中可以看出每 128 个码片代表一个码元,一个码元承载 7b 数据 ($b_1/b_2/b_3/b_4/b_5/b_6/b_7$),不同的码片连接方式代表不同的码元。由于每个码元最多承载 7b 数据,所以只要有 128 种码元即可表达 7b 的所有状态。

图 3-9 中有三个时间长度分别是码片率(Chip Rate)、数据速率(Data Rate)、码元率(Symbol Rate),可以清楚地看出它们的对应关系。3.1 节有关于这三个参数的详细分析。

关于码片如何组合成码元来代表 7b 数据,可以简单地认为一个码元在其周期内的起始频率(第一个码片对应的 f_n)决定了该码元代表的的数据。由于 LoRa 调制是通过 Delta-Sigma 调制器的数字输出驱动锁相环的反馈分频器,那么只能实现连续的频率调节,符合这种初始值连续的方案。



视频讲解

不同的 SF 对应带宽 BW 除以时间的斜率, SF 越大, 倾斜角度越小。SF 和 BW 对应一种 LoRa 调制方式, 只有接收机也采用对应的 SF 和 BW 值才能正常解调, 否则信号在相干解调中会淹没在噪声中。在实际的相干解调中, LoRa 调制在不同的 SF 信号或不同的 BW 下都是正交的, 频带可以充分利用。比如在 $BW=125\text{kHz}$ 的同频段内, 一个 $SF=7$ 信号 P_{SF7} 和一个 $SF=8$ 信号 P_{SF8} 都在发射, 频段内的噪声为 N_0 , 当两个信号都满足解调信噪比要求时 ($\text{SNR}_{SF7} \geq -7.5\text{dB}$; $\text{SNR}_{SF8} \geq -10\text{dB}$), 两个信号都可以正常解调。这里需要注意, 当计算 SNR_{SF7} 时, $SF=8$ 的信号表现为此系统噪声, $\text{SNR}_{SF7} = P_{SF7} / (N_0 + P_{SF8})$; 同理当计算 SNR_{SF8} 时, $SF=7$ 的信号表现为此系统噪声, $\text{SNR}_{SF8} = P_{SF8} / (N_0 + P_{SF7})$

3.3.2 LoRa 数据发送实例

下面根据一个实际的 LoRa 数据发送案例, 帮助读者了解 LoRa 发送数据的全过程。

图 3-10 所示为一次 LoRa 数据标志变化发送的全过程。其中要发送的数据内容为英文字符“LoRa”, 发射参数为 $SF=8, BW=125\text{kHz}, CR=4/5$, 中心频率为 470MHz 。

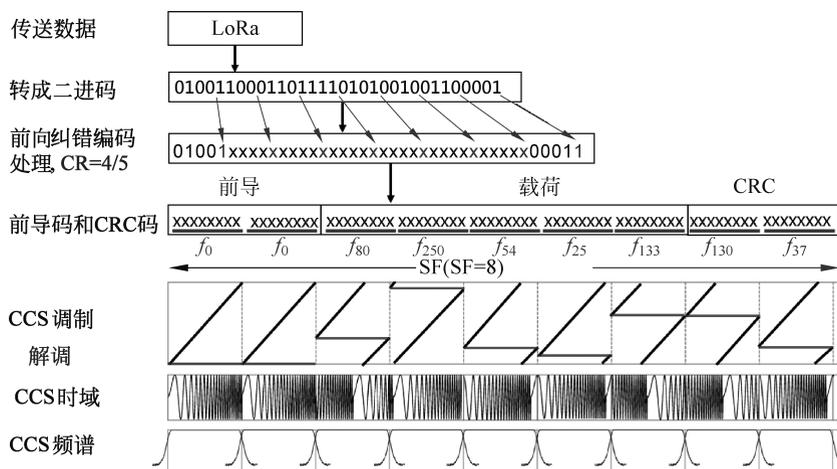


图 3-10 LoRa 调制封包及数据传输意图(见彩插)

首先需要将“LoRa”字符通过 ASCII 码转换为二进制数据。通过查表得到：“L”=01001100；“o”=01101111；“R”=01010010；“a”=01100001。如图 3-10 中转换为二进制数据串：“01001100011011110101001001100001”，共 32b。

下一步为前向纠错编码处理, 每 4b 后面增加 1b 的纠错位, 如图 3-10 中纠错位加入后的数据流为：“0100111000011001111001010001010110000011”，共 40b。

完成前向纠错编码后的数据需要进入交织器, 由于采用 $SF=8$ 编码, 交织器的大小为 8 行 5 列。将前向纠错编码处理后的 40b 数据通过映射放入交织器中。此时有效载荷数据通过 5 个 $SF=8$ 的码元携带。

负载(Payload)数据配置好后, 增加前导和 CRC 校验, 为一个标准的 LoRa 数据包, 可

以发送到数字输出驱动锁相环的反馈分频器。图 3-10 中 2 个前导(Preamble)都是 f_0 的码元,而要发送的载荷数据为 f_{80} 、 f_{250} 、 f_{54} 、 f_{25} 、 f_{133} ,CRC 校验的两个码元为 f_{130} 和 f_{37} 。此时 LoRa 功率放大器输出的信号频率随时间变化的状态如图 3-10 中 CCS 调制部分所示,同时可以观察到其时域图形的变化规律。

如果需要解调本案例中的信号,只需要解调图中 CCS 调制中的横线代表的频率 f_n 即可获得每个码元的数据,具体解调流程比较复杂,请参照 3.1.1 小节的讨论。

小结

本章内容虽然不多,但是关于 LoRa 调制方法和解调路径的资料外界几乎没有。尤其是本书中的实际 LoRa 案例,读者应仔细学习。本章介绍的 LoRa 调制参数,后续章节都会用到,需要完全掌握。LoRa 计算器工具也希望读者从 Semtech 官网下载,反复操作熟练。