

多脉冲 PPK 的编码调制基本分析*

周亮** 尹道素

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

【摘要】 分析了多脉冲 PPK 编码调制方式的基本性能, 给出了脉冲 PPK 调制器调制的传信率计算式, 指出了它的信号空间与冗余性的特点, 证明了多脉冲 PPK 不但优于单脉冲 PPK, 而且在适当信号设计的条件下, 在传信率上甚至优于二进制 OOK。

关键词 光通信; 脉位调制; 编码调制; 传信率

中图分类号 TN787.3

在光通信中, 由于大多数实际的光调制都是强度调制, 因此, 以光脉冲的有无来传输 1、0 序列, 即 OOK (开关键控) 方式是主要的二进制调制方式。为提高传输码率及传输通道抗干扰的能力, 光调制大多采用 PPM (脉冲位置调制) 这种多进制的调制方式, 其中 PPK (脉冲位置键控) 方式在近年来备受关注^[1, 2]。

1 单脉冲 PPK 与多脉冲 PPK

单脉冲 PPK 调制, 是将二进制的 n 元组 $u = (u_1, \dots, u_n)$ 映射为由 2^n 个时隙组成的时段上某个时隙处的单个脉冲信号, 如图 1 所示, 若记时隙位置为 l , 则

$$l = \Phi(u_1, \dots, u_n) \in \{0, 1, \dots, 2^n - 1\}$$



图 1 单脉冲 PPK

一种常用的映射编码关系是

$$\Phi: l = u_1 + 2 u_2 + \dots + 2^{n-1} u_n \in \{0, 1\} \tag{1}$$

显然由式 (1) 决定的映射 Φ 是一对一映射, 满足调制唯一性的要求。单脉冲 PPK 信号是一个脉冲序列, 每个时段一个脉冲, 代表 n bit 信息。

多脉冲 PPK 调制方式则是将二进制的 n 元组 $u = (u_1, \dots, u_n)$ 映射为有 M 个时隙组成的时段上同时出现的多个脉冲信号。双脉冲 PPK 调制, 如图 2 所示。

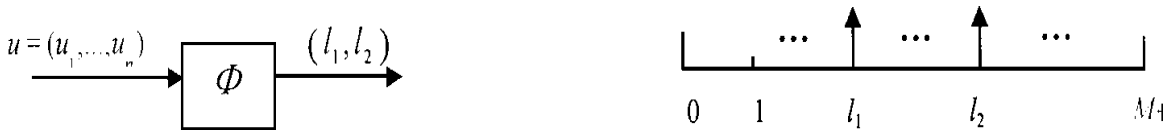


图 2 双脉冲 PPK

1998 年 7 月 25 日收稿

*电子工业部预研基金资助项目

**男 38 岁 在职博士生 副教授

若记两脉冲位置分别是 l_1, l_2 , 则可以描述为

$$\begin{cases} (l_1, l_2) = \phi(u_1, \dots, u_m) \\ (l_1, l_2) \in \{0, 1, \dots, M-1\}, u_i \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (2)$$

对于调制的一个基本要求是 $l_1 l_2$ 对的变化要能够足以反映信息输入 u 的变化, 若记 $(l_1 l_2)$ 的变化种类数为 N_2 , 则应有

$$N_2 \geq M \quad (3)$$

在实际实现系统中, 通常取 $M = 2^m$ 。由于 l_1, l_2 均限制在 $\{0, 1, \dots, M-1\}$ 中取值, N_2 也是 M 或 m 的函数。

由于 PPK 调制是时间序列方式, 可以从时间先后区分脉冲, 因此, 多脉冲 PPK 调制又可以按多个脉冲的组合和排列方式分为多脉冲组合和多脉冲排列 PPK, 这种排列或组合的种类表征了多脉冲 PPK 的传信能力。对于多脉冲排列 PPK, 各个脉冲应有不同的特征, 如选取不同的脉宽, 或通过副载波进行调频、调相, 使其具有不同的副载波频率或相位。

记 2^m 个时隙上 k 脉冲 PPK 的组合关系数为 $NC_k(m)$, 排列关系数为 $NP_k(m)$, 则有

$$NC_k(m) = \frac{2^m!}{k!(2^m - k)!} \quad (4)$$

$$NP_k(m) = \frac{2^m!}{(2^m - k)!} = k!NC_k(m) \quad (5)$$

容易证明

$$NC_k(m) = \frac{1}{k}(2^m - k + 1)NC_{k-1}(m) \quad (6)$$

$$NP_k(m) = (2^m - k + 1)NP_{k-1}(m) \quad (7)$$

因而可以方便计算得到多脉冲 PPK 的传信能力, 如表 1 所示。

表 1 多脉冲 PPK 的传信能力比较 ($k = 1, 2, 3, 4$)

m	1	2	3	4	5	6	7	8
$2^m (k=1)$	2	4	8	16	32	64	128	256
$NC_2(m)$	1	6	28	120	496	2 016	8 128	32 640
$NC_3(m)$	0	4	56	560	4 960	41 664	341 376	2 763 520
$NC_4(m)$	0	1	70	1 820	35 960	635 376	10 668 000	174 792 640
$NP_2(m)$	2	12	56	240	992	4 032	16 256	65 280
$NP_3(m)$	0	24	336	3 360	29 760	249 984	2 048 256	16 581 120
$NP_4(m)$	0	24	1 680	43 680	863 040	15 249 024	25 603 200	4 195 023 360

还可以证明, 当 $k = 2^{m-1}$ 时, $NC_k(m)$ 以及 $NP_k(m)$ 达到最大值, 同时还可以看到普通 OOK 可以等价于 $k = 2^m$ 时的 k 脉冲 PPK 方式。

由表 1 明显可见, 多脉冲 PPK 的传信能力随着 k 的增加急剧增大, 例如, 若选用 $m = 4$, 即 16 个时隙的 PPK 方式, 则单脉冲方式只能传 4 bit 信息, 而双脉冲、三脉冲和四脉冲组合 PPK 方式可以分别传 6 bit ($2^6 < 120 < 2^7$)、9 bit ($2^9 < 560 < 2^{10}$) 和 10 bit ($2^{10} < 1 820 < 2^{11}$) 信息, 但是双脉冲、三脉冲和四脉冲排列 PPK 方式却可以分别传 7 bit ($2^7 < 240 < 2^8$), 11 bit (2^{11})

$< 3\ 360 < 2^{12}$) 和 15 bit ($2^{15} < 43\ 680 < 2^{16}$) 信息。对于 8 个时隙的 PPK 调制脉冲排列方式达到最大传信能力时, 每时段传 10 bit ($2^{10} < 1\ 680 < 2^{11}$) 信息, 如果保持传信率不变, 则此时四脉冲排列 PPK 调制方式的传信能力甚至大于二进制调制的传信能力 (8 bit) 而可以没有任何带宽扩张。但单脉冲 PPK 只有 3 bit 传信能力, 却有近 3 倍的带宽扩张。

2 多脉冲 PPK 的传信率与带宽分析

比较不同调制方式的一个基本参数是单位传信率, 即每秒每赫兹传输比特数 γ

$$\gamma = \frac{R}{B} (\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}) \quad (8)$$

其中 R 是传输速率 ($\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$); B 是信号带宽 (Hz)。

在光通信中, 激光器通常工作于脉冲状态, 脉冲持续时间为 τ , 相应的信号带宽定义为

$$B (\text{Hz}) = \frac{1}{\tau} (\text{s}) \quad (9)$$

但若占空比为 r_p , 则码元时宽为 $T = \tau / r_p$, 相应的传输速率为 R

$$R = 1 / T \quad (10)$$

对于 OOK 调制方式

$$\gamma_{\text{ook}} = \left(\frac{1}{T} \right) \left(\frac{1}{\tau} \right) = \frac{\tau}{T} = r_p \leq 1 \quad (11)$$

对于单脉冲 PPK, 若时隙数为 2^m , 则 2^m 个时隙组成的时段宽为 $T_{1 \text{ PPK}}$

$$T_{1 \text{ PPK}} = 2^m \frac{\tau}{r_p} \quad (12)$$

因此

$$\tau_{1 \text{ PPK}} = \left(\frac{m}{T_{1 \text{ PPK}}} \right) \left(\frac{1}{\tau} \right) = \frac{(r_p m)}{2^m} \quad (13)$$

对于 k 脉冲 PPK 若时隙数仍定义为 2^m , 则 $T_{k \text{ PPK}} = T_{1 \text{ PPK}}$, 并且

$$\gamma_{k \text{ PPK}} = \frac{(r_p \log_2 N_k(m))}{2^m} \quad (14)$$

其中 $N_k(m)$ 或者是组合方式数 $NC_k(m)$, 或者是排列方式数 $NP_k(m)$ 。

由以上分析得到, k 脉冲 PPK 单位传信率优于二进制 OOK 的条件是

$$N_k(m) \geq 2^{2^m} \quad (15)$$

由表 1 可以看出, 四脉冲排列方式 PPK 在 $m = 3$ 时是优于 OOK 方式的。

多脉冲 PPK 调制方式的另一个基本参数是带宽扩张比 r_B , 它定义为传输时间不变情况下, 传输同等数量比特数时, 多脉冲 PPK 所需带宽与 OOK 所需带宽之比。

对于 OOK 调制, 所需带宽为 $1/\tau$, 将它与单脉冲 PPK 作比较时, 由于单脉冲 PPK 占用时段宽度由式 (13) 确定 (其中 $\tau = \tau_{\text{PPK}}$), 因此, 在传输 m bit 时, 令

$$m \frac{\tau_{\text{OOK}}}{\tau_{p \text{OOK}}} = 2^m \frac{\tau_{\text{PPK}}}{\tau_{p \text{PPK}}}$$

得

$$\tau_{\text{PPK}} = \frac{m}{2^m} \frac{r_{p\text{PPK}}}{r_{p\text{OOK}}} \tau_{\text{OOK}} \quad (16)$$

由此可见, 如果 OOK 与单脉冲 PPK 的脉冲占空比相同, 则单脉冲 PPK 相对于 OOK 的带宽扩张比为

$$r_{B\text{PPK}} = \frac{2^m}{m} \quad (17)$$

显然, 对于 k 脉冲 PPK, 若 OOK 与 k 脉冲 PPK 的占空比相同, 则 2^m 时隙 k 脉冲 PPK 相对于 OOK 的带宽扩张比为

$$r_{Bk\text{PPK}} = \frac{2^m}{\log_2 N_k(m)} \quad (18)$$

其中 $[\cdot]$ 表示取整运算。

由此可见, k 脉冲 PPK 无带宽扩张的条件仍是式 (15)。于是, 将上述讨论用定理表述如下:

定理 1 k 脉冲 PPK 调制方式在传输率与带宽上优于二进制 OOK 调制方式的条件是式 (15)。

3 多脉冲 PPK 的信号空间分析

考虑有 2^m 个时隙的 PPK 调制方式, 记脉冲位置时隙为记数 l

$$l \in \{0, 1, 2, \dots, 2^m - 1\} = Z_{2^m}$$

因此, 单脉冲 PPK 的信号星座可以表述为整数集 Z_{2^m} , 但此时若定义信号点间距离 $d(l_1, l_2)$ 为

$$d(l_1, l_2) = |l_1 - l_2| \quad (19)$$

则它并不反映脉冲信号的能量特性以及相应的抗干扰特性, 对于带限信号来说, $d(l_1, l_2)$ 只在某种程度上反映脉冲间的串扰情况。另一方面, 由于 PPK 的特点, 对于平稳噪声干扰来说, 各个信号的能量相同, 因而若不考虑脉冲间串扰, 各个信号点的抗干扰性能相同。

对于双脉冲 PPK 调制方式, 两个脉冲位置记数 l_1, l_2 均满足

$$l_1, l_2 \in \{0, 1, 2, \dots, 2^m - 1\} = Z_{2^m}$$

但由于两脉冲不能重叠, 以及排列组合两种方式, 双脉冲 PPK 调制信号星座 S 是 $Z_{2^m} \times Z_{2^m}$ 的子集, 见图 3 所示。若记 S_C 为组合方式 PPK 星座, S_P 为排列方式星座, 则

$$S_C = \{(l_1, l_2) \mid l_1 \geq l_2, l_1, l_2 \in Z_{2^m}\} \quad (20)$$

$$S_P = \{(l_1, l_2) \mid l_1 \neq l_2, l_1, l_2 \in Z_{2^m}\} \quad (21)$$

同样, 由于 PPK 方式自身的特点, 按 QAM 类似的距离定义来定义双脉冲 PPK 的信号点间距离没有实际意义, 因此, 我们定义双脉冲 PPK 信号点间的距离为

$$d((l_1, l_2), (l'_1, l'_2)) = \min\{|l_1 - l'_1|, |l_2 - l'_2|\} \quad (22)$$

以此类推, k 脉冲组合 PPK 方式的信号星座 $S_C(k)$, 排列方式为 $S_P(k)$

$$S_C(k) = \{(l_1, \dots, l_k) \mid l_1 \geq l_2 \geq l_k, l_i \in Z_{2^m}, i = 1, 2, \dots, k\} \quad (23)$$

$$S_P(k) = \{(l_1, \dots, l_k) \mid l_i \neq l_j, l_i, l_j \in Z_{2^m}, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, k\} \quad (24)$$

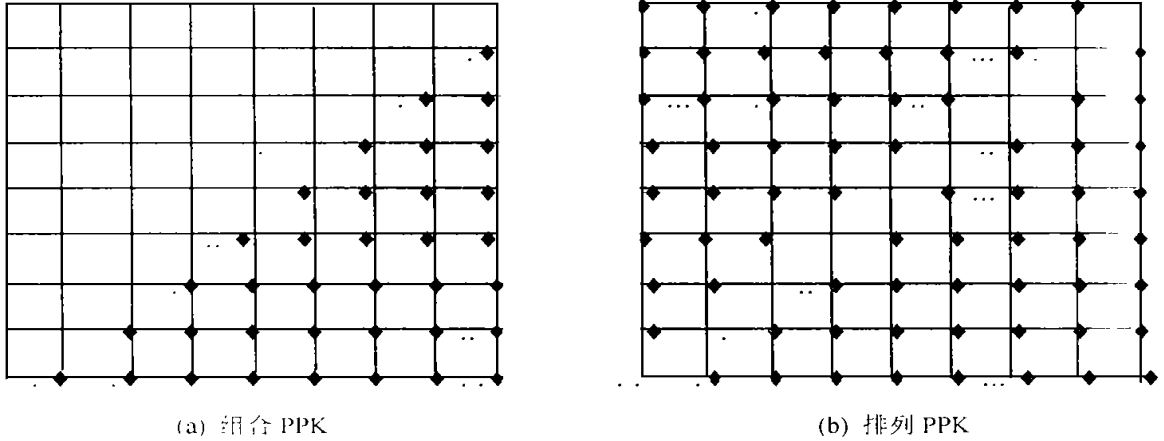


图3 双脉冲 PPK 星座 ($m = 3$ ◆为星座点)

相应的 k 脉冲 PPK 星座中信号点间的距离为 $d(l_1, l_2)$ ，并定义为

$$d(l, l') = d((l_1, \dots, l_k), (l'_1, \dots, l'_k)) = \min\{|l_1 - l'_1|, \dots, |l_k - l'_k|\} \quad (25)$$

因此

容易证明，对任意的信号点 l, l', l'' ，下面两式关系总成立

$$d(l, l') = d(l', l)$$

$$d(l, l') + d(l', l'') \geq d(l, l'') \geq 0$$

因而定义距离时， k 脉冲 PPK 信号星座形成距离空间。

4 多脉冲 PPK 信号的冗余性分析

对于 2^m 时隙 k 脉冲 PPK 调制，若要传送 b 个 bit，则总要求信号星座 S 的容量

$$|S| = N_k(m) \geq 2^b \quad (26)$$

当式 (26) 的不等式成立时，实际所需的信号点集 S_0 是 S 的真子集，因此，一方面信号空间可以具有相当大的冗余度，另一方面提供了差错控制编码设计的可能性。

定义传送 b 个 bit 的信号空间的冗余度为 r_s

$$r_s = N_k(m) / 2^b \quad (27)$$

从表 2 可以看出，适当选择 k 和 m ，可以有效控制冗余度的设计，例如当 $m = b$ 时的冗余度 $r_s(k)$ 如表 2 和表 3 所示。

表 2 k 脉冲组合式 PPK 的冗余度 ($m = b$)

m	1	2	3	4	5	6	7	8
$r_s(2)$	0.5	1.5	4.5	8.5	15.5	31.5	64.5	128.5
$r_s(3)$	0	1	7	35	155	651	2 667	10 795
$r_s(4)$	0	0.25	8.75	114.75	1 124.75	9 928.75	83 344.75	682 784.75

表 3 k 脉冲排列式 PPK 的冗余度 ($m = b$)

m	1	2	3	4	5	6	7	8
$r_s(2)$	1	3	7	15	31	63	127	255
$r_s(3)$	0	6	42	210	930	3 906	16 002	64 770
$r_s(4)$	0	6	210	2 730	26 970	238 228	2 000 250	16 386 810

5 小 结

多脉冲 PPK 是单脉冲 PPK 的推广, 甚至 OOK 也可以等价作为一种特殊的多脉冲 PPK。多脉冲 PPK 在一定条件下, 具有比单脉冲 PPK 和 OOK 更高的传信率, 并且没有带宽扩张, 因此它是一种有效节省带宽的调制方式。适当的参数设计可使多脉冲 PPK 调制方式本身具有相当大的冗余度, 从而提供了进行差错控制编码的可能, 多脉冲 PPK 在一定条件下可以获得一种有效节省能量的调制方式。

由此进一步研究多脉冲 PPK 的调制方式特性, 如差错特性、抗串扰能力、编码方式以及译码、解调等课题有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Sun X, Davidson F M, Field C. 50-Mbps free-space direct detection laser diode optical communications system with Q=4PPM signaling. SPIE, 1990. 1 218: 385~396
- 2 Mortensen D J. Testing and performance analysis of a 650-Mbps quaternary pulse position modulation (QPPM) modem for free space laser communications. SPIE, 1995. 2 381: 129~142

Basic Characteristics Analysis of Multiple Pulses PPK Coded Modulation

Zhou Liang Yin Daosu

(Institute of Applied Physics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract This paper analyses the multiple pulses PPK coded modulation characteristics, such as signal space, redundancy, ratio of data rates and band. The calculation for ratio of data rates is given. Under certain conditions, multiple pulses PPK has higher data rates than single pulse PPK and OOK, and it has not bandwidth spread. Suitable parameter choice can space much larger redundancy than that of the multiple pulses PPK itself, and thus provide the capability of correct coded control.

Key words optical communications; pulse position modulation; coded modulation, ratio of data rates and band