文章编号:1001-893X(2012)10-1614-05

# 16 - APSK 信号 NDA 鉴相新算法\*

徐 烽1,邱乐德2,王 宇1

(1.中国空间技术研究院 西安分院,西安 710100;2.中国空间技术研究院,北京 100094)

摘 要:针对幅相联合键控(16-APSK)信号,基于 V&V 算法提出了一种用于反馈环路的非数据辅助的(Non Data-Aided, NDA)鉴相算法。该算法首先对信号进行星座分割,然后对各子星座上的点分别 应用 V&V 算法,不同子星座鉴相的权重可通过参数设置方便地进行控制。同时,还提出了一种变体 算法,针对每个子星座,将 V&V 算法对信号幅度的非线性运算直接替换为一个固定的幅度,使得对 各子星座鉴相权重的控制更加简单,也更便于工程实现。经仿真验证,通过恰当控制算法参数,可以 起到降低鉴相模糊度的作用,有利于简化 16-APSK 信号鉴相的解模糊处理。

关键词:16 - APSK;鉴相;反馈环路;非数据辅助;星座分割 中图分类号:TN911.8 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.10.011

## Novel Non-Data-Aided Phase Detector Algorithms for 16 – APSK Signals

 $XU \ Feng^1$ ,  $QIU \ Le-de^2$ ,  $WANG \ Yu^1$ 

(1. Xi'an Branch of China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China;2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: For 16 – APSK (Amplitude and Phase Shift Keying) signals, a Non-Data-Aided(NDA) phase detector algorithm based on V&V algorithm is proposed. The APSK constellation is partitioned, and V&V algorithm is applied for each sub-constellation. By parameter setting, detector weight of each sub-constellation can be conveniently controlled. A variant of this algorithm is also given, in which the nonlinear operation in each sub-constellation detector is substituted by a pre-designated constant value. This variant algorithm provides easier weight control, and is more convenient for engineering implementation. Simulation results prove that, with proper parameter control, the proposed algorithms can reduce phase ambiguity of 16 – APSK phase detection to 4 fold, thus simplifying the phase ambiguity resolution process.

Key words: 16 - APSK; phase detector; feedback loop; non-data-aided; constellation partition

## 1 引 言

由于对卫星信道的非线性具有更好的容忍性, 幅相联合键控<sup>[1]</sup>(Amplitude and Phase Shift Keying, APSK)调制已经成为卫星通信中高阶调制方式的首 选,例如,16 – APSK 和 32 – APSK 已经被 DVB – S2<sup>[2]</sup> 标准采用,而 64 – APSK 也是欧空局项目<sup>[3]</sup>研究的 高阶调制方式之一。载波相位同步是数字卫星通信 接收机的重要任务,是顺利实现信号解调的前提。 载波相位同步的实现可采用反馈(闭环)和前馈(开 环)两种结构,其中反馈结构具有优良的载波跟踪性 能,但存在一定的捕获时间,一般用于连续通信中, 在新型的长突发通信中也可考虑采用。

APSK 是一种线性调制方式,对于线性调制信号的反馈载波相位跟踪环路,有许多判决导引(Decision Directed, DD)和非数据辅助(Non-Data Aided, NDA)的鉴相算法<sup>[4-5]</sup>可用,原则上它们也适用于 APSK 信号(有的算法要稍做修改)。但由于 APSK

<sup>\*</sup> 收稿日期:2012-03-27;修回日期:2012-05-09

具有不同于一般的方形 OAM 调制的圆形星座,因 此,针对其具体星座特点的载波相位同步算法也引 起了相关研究人员的兴趣。R. De Gaudenzi 等 人<sup>[1,6]</sup>针对 DVB - S2 的 16 - APSK 和 32 - APSK 信 号星座特点,提出了一种混合 NDA/DD 的方法,文 献[7]的研究表明,这种方法的抖动方差与单纯 V&V 法<sup>[8]</sup>没有明显差别。汪春霆等人<sup>[9]</sup>以 16 - AP-SK为例,给出了利用 MMSE 准则进行 APSK 信号 NDA 相位估计的方法,可以把 16 - APSK 鉴相的相 位模糊度从12降为4,其缺点是计算复杂度很高, 作者以查找表的方法减小实时运算量。N. Wu 等 人<sup>[10]</sup>针对前馈载波恢复结构,提出一种 APSK 星座 分割法,将高阶 APSK 信号星座分割(最内两圈未做 进一步划分)后分别用 V&V 法鉴相,最后再对各部 分鉴相结果进行加权求和,获得了较好的载波相位 恢复性能,其缺点是复杂度较高,而且在有残留频偏 时,其同步性能明显恶化。

受文献[10]的启发,本文研究在反馈载波同步 结构中采用 APSK 星座分割进行鉴相,实现 16 - AP-SK 信号载波相位同步的方法。下面首先介绍使用 的系统模型,第3节说明鉴相算法,第4节是仿真与 性能分析,第5节给出结论。

## 2 系统模型

APSK 是采用圆形星座的幅度-相位联合键控调制方式,其星座图由多个圆组成,每个圆上的星座点均匀分布,信号等效基带模型为

$$c_k = R_k \exp\left[j\left(\frac{2\pi}{n_k} + \theta_k\right)\right], k = 1, 2, \cdots, K$$
(1)

式中,  $R_k$ 和 $n_k$ 分别为第k个圆的半径和星座点数, K为星座圆周数,  $\theta_k$ 为第k个圆周上第一个星座点 的初相位。图1给出了 DVB – S2标准采用的16 – APSK 调制的星座图, 它包括2个圆, 内圆4个点, 外 圆12个点。



图 1 16 – APSK 星座图(DVB – S2) Fig. 1 16 – APSK constellation (DVB – S2)

假设符号定时理想,则接收机匹配滤波器以符 号速率输出的信号为

$$y_k = c_k \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_k} + n_k \tag{2}$$

式中,  $c_k$  是 16 – APSK 复信号,  $\theta_k$  为动态变化的载波 相位,  $n_k$  是功率谱密度为  $N_0$  的复高斯白噪声序列。

本文采用常见的二阶载波恢复环路,使用的反 馈环路结构如图2所示。



#### Fig.2 Feedback carrier recovery loop

## 3 鉴相算法

由于 APSK 星座是由多个圆构成,可以看作多 个 M – PSK 调制星座的组合,因此,用于 M – PSK 信 号的鉴相方法对 APSK 鉴相有重要的参考价值。 V&V<sup>[8]</sup>算法是 M – PSK 信号的经典 NDA 鉴相算法, 也是本文的主要参考对象,V&V 算法可直接用于 16 – APSK 信号。

V&V 算法的误差信号表达式为

$$e_k = -\frac{1}{m} \operatorname{Im} \{ |y_k|^{\mu} \exp[jm \arg(y_k)] \}$$
(3)

适当选择参数  $\mu$  可以起到减小抖动的作用,参数 m 是为了消除信号中的调制信息。当  $\mu = m$  时, V&V 法就变成了幂律法。

对 M – PSK 信号,只要选取 m = M 即可;而对 APSK 信号, m 的值要取各圆上星座点数的最小公 倍数,对 16 – APSK 信号, m 的值需要取 12(对 32 – APSK 和 64 – APSK,分别需要取 m = 48 和 m = 96, 非线性运算次数过高,对星座进行分割处理<sup>[10]</sup>可以 降低 m 的值)。为解决将 V&V 算法用于高阶 APSK 信号需要的非线性运算次数过高的问题,文献[10] 针对前馈同步结构提出了星座分割处理方法,但由 于采用了前馈结构,在有残留频偏时跟踪性能变差, 而且该方法未对最内层的两圈星座点进一步划分。

鉴于采用反馈结构可以获得更好的载波跟踪性能(有残留频偏的条件下也可以顺利跟踪),本文探讨在反馈载波同步结构中,对16-APSK采用星座分割鉴相法的载波跟踪性能。

将 16 – APSK 星座以两圈信号半径的中值  $th_1$  =  $(R_1 + R_2)/2$  为门限,分割为两个子星座。对接收

到的信号,首先根据其半径判断属于哪个子星座,之 后使用如下的鉴相算法:

$$e_{k} = -\frac{1}{m_{i}} \operatorname{Im} \{ |y_{k}|^{\mu_{i}} \exp[jm_{i}\arg(y_{k})] \}$$
(4)

其中,*i*=1,2的值代表星座圆的序号,*m<sub>i</sub>*和μ<sub>i</sub>根据 信号半径(即在星座的哪个圆上)取不同的值。下文 将这种算法称为"星座分割-V&V法"。

提出这种星座分割法,是基于如下考虑:

(1)可以在鉴相过程把内圈的点也充分利用起 来(对内圈 4 个点来说, m = 12 的非线性运算次数过 高了,大大增强了噪声的影响,使其鉴相结果的有效 性变差);

(2)通过调整参数,可以分别控制内、外圈点鉴 相的权重,这样可以在降低模糊度和减小抖动方差 之间取折衷(增大内圈的权重,则模糊度降低,抖动 变大)。

另外,为了方便工程实现,这里再给出"星座分割-V&V法"的一种变体:

$$e_k = -\frac{1}{m_i} \operatorname{Im} \{ MAG_i \exp[jm_i \arg(y_k)] \}$$
(5)

其中, MAG<sub>i</sub>(i = 1,2)为针对内、外圈信号分别预先 指定的一个幅度值,也就是说,对信号的幅度不进行 幂运算,而直接使用一个常数,这可以简化工程实 现。后文将这种方法称为"星座分割-指定幅度法"

由于星座分割之后,会使理论分析变得非常复杂(存在原本在内圈的点出现在外圈、或外圈的点出 现在内圈的情况),因此接下来使用仿真的方法分析 算法性能。

## 4 仿真与性能分析

下面使用仿真方法对比 V&V 法、"星座分割-V&V 法"、"星座分割-指定幅度法"的性能,主要对比 各算法的开环鉴相器特性(S-曲线)和闭环相位抖动 方差。

4.1 鉴相器特性(S-曲线)

· 1616 ·

图 3 给出了 3 种鉴相算法在(-π/4,π/4)区间 的 S-曲线,3 种鉴相的参数设置如下:

(1)V&V法: $\mu = 2, m = 12;$ 

(2) 星座分割-V&V 法: μ1 = 0, m1 = 4; μ2 = 1,
 m2 = 12;

(3) 星座分割-指定幅度法: *MAG*<sub>1</sub> = 1, *m*<sub>1</sub> = 4; *MAG*<sub>2</sub> = 0.3175, *m*<sub>2</sub> = 12。

从图中可以看出, V&V 法对两圈星座点只能采

用同样的参数处理,得到的 S-曲线是具有 12 重模糊 度的均匀正弦特性曲线(在( $-\pi/4,\pi/4$ )区间存在 3 个稳定平衡点);而"星座分割-V&V法"的  $\mu$  和 m 针 对内外圈可以取不同的值,这里通过取  $\mu_1 = 0$  增强 了内圈点在鉴相过程中的权重,使其在( $-\pi/4,\pi/4$ ) 区间只存在一个明显的稳定平衡点;而在"星座分割 指定幅度法"中,通过设置  $MAG_1 = 1, MAG_2 =$ 0.317 5,进一步削弱了外圈点在鉴相过程中的权 重,使得 S-曲线更接近只有 4 重模糊度的 QPSK 鉴 相特性曲线。



Fig. 3 S-curve comparison ( $E_s/N_0 = 16 \text{ dB}$ )

#### 4.2 抖动方差

图 4 对比了几种鉴相算法的闭环相位抖动方 差,几种鉴相算法的参数设置如下:

(1)V&V法: $\mu = 2, m = 12;$ 

(2)星座分割-V&V(1):  $\mu_1 = 2, m_1 = 4; \mu_2 = 2, m_2 = 12;$ 

(3)星座分割-V&V(2):  $\mu_1 = 0, m_1 = 4; \mu_2 = 1, m_2 = 12;$ 

(4)星座分割-指定幅度(1): MAG<sub>1</sub> = 0.360 6,
 m<sub>1</sub> = 4; MAG<sub>2</sub> = 1.135 9, m<sub>2</sub> = 12;

(5)星座分割-指定幅度(2): *MAG*<sub>1</sub> = 1, *m*<sub>1</sub> = 4; *MAG*<sub>2</sub> = 0.317 5, *m*<sub>2</sub> = 12。



图 4 抖动方差对比 Fig.4 Jitter variance comparison

这里"V&V 法"的参数  $\mu = 2$ ,可以获得较小的 抖动方差;"星座分割-V&V(1)"与"V&V 法"的区别 仅在于对内圈的点使用了  $m_1 = 4$  的设置,得到的抖 动方差与"V&V 法"几乎完全一致;"星座分割-V&V (2)"采用了  $\mu_1 = 0$ ,  $\mu_2 = 1$  的设置,增强了内圈点在 鉴相过程中的权重,因此抖动方差明显变大;"星座 分割-指定幅度法(1)"的  $MAG_1$ 和  $MAG_2$ 分别设置为 星座内、外圈的半径,其抖动方差也与"V&V 法"几 乎完全相同;而"星座分割-指定幅度法(2)"设置  $MAG_1 = 1$ 和  $MAG_2 = 0.3175$ ,大大削弱了信噪比较 高的外圈点在鉴相过程中的权重,因此使抖动方差 变得很大。

#### 4.3 星座分割法分析

从上面的仿真结果看,对 16 - APSK 星座进行 分割后鉴相,在抖动方差性能方面并不能获得任何 好处,但通过分别控制内、外圈鉴相的参数,可以很 方便地控制内、外圈点鉴相的权重的大小,在降低相 位模糊度和减小抖动方差之间取得折衷。

图 5 给出了一个二阶 PLL 中,鉴相方法分别采 用 V&V 法( $\mu$  = 2, m = 12)和"星座分割-V&V 法"( $\mu_1$ = 0,  $m_1$  = 4;  $\mu_2$  = 0,  $m_2$  = 12),对同一帧 16 – APSK 信 号的跟踪情况对比。



图 5 相位跟踪情况对比 (*E<sub>s</sub>*/*N<sub>o</sub>* = 20 dB,归一化频偏 0.001,初始相偏 – 1.444 6) Fig.5 Phase tracking comparison(*E<sub>s</sub>*/*N<sub>o</sub>* = 20 dB, normalized frequency offset:0.001, initial phase offset: -1.444 6)

从仿真结果可明确看出:V&V 法具有较小的抖动方差,但由于相位模糊度为 12,恢复出的星座图 是一个偏转了的 16 - APSK 星座图;而"星座分割-V&V 法"虽然抖动方差较大,但恢复出的星座图是 (受噪声污染了的)标准的 16 - APSK 星座图(实际 仍存在4重模糊度)。这里没有给出对"星座分割-指 定幅度法"的仿真,因为其结果与"星座分割-V&V法" 基本相同,差别仅在于它的工程实现更加简单而已。

以抖动性能的损失换取相位模糊度的降低,在 某些场合是一种有用的技术。例如,在有些载波相 位跟踪方案中,载波同步的初期阶段更注重捕获而 不注重跟踪性能,就可以采用这种方法降低 PLL 跟 踪的相位模糊度,以利于后面的解相位模糊处理。

### 5 结 论

针对 16 – APSK 信号,本文提出一种适用于反 馈载波跟踪结构的鉴相方法,同时提出它的一种更 利于工程实现的变体。这种方法的基本思想是先将 APSK 的星座分割为 M – PSK 星座,对每个 M – PSK 星座分别应用 V&V 算法,通过参数 μ(或者 MAG<sub>i</sub>) 的设置可以很方便地控制内、外圈星座点在鉴相过 程中权重的大小。与传统的 V&V 算法相比,该算法 在某些场合可以用抖动方差性能换取相位模糊度的 降低。仿真结果证明了这种算法的有效性,而且,采 用指定幅度的方法,还可以在基本不损失性能的条 件下得到更简单的工程实现。针对 APSK 信号,在 反馈结构中使用星座分割鉴相法是值得进一步研究 的一种算法,接下来可以考虑将该方法推广到更高 阶 APSK 信号的载波环中的鉴相。

#### 参考文献:

- [1] De Gaudenzi R, Fabregas A G I, Martinez A. Performance analysis of turbo-coded APSK modulations over nonlinear satellite channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006,5(9):2396 – 2407.
- [2] Morello A, Mignone V. DVB S2: The second generation standard for satellite broad-band services [J]. Proceedings of IEEE, 2006,94(1):210 – 227.
- [3] Benedetto S, Garello R, Montorsi G. MHOMS: high-speed ACM modem for satellite applications [J]. IEEE Wireless Communication Magizame, 2005,12(2):66 – 77.
- [4] Mengali U, Andrea A N D. Synchronization Techniques for Digital Receivers[M]. New York: Plenum Press, 1997.
- [5] Meyr H, Moeneclaey M, Fechtel S A. Digital communication receivers: synchronization, channel estimation, and signal processing[M]. New York: Wiley, 1998.
- [6] Casini E, De Gaudenzi R, Ginesi A. DVB S2 modem algorithms design and performance over typical satellite channels [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2004, 22(3):281 – 318.

- [7] Gappmair W, Cioni S, Vanelli coralli A, et al. Exact analysis of different detector algorithms for NDA carrier phase recovery[J]. European Transactions on Telecommunications, 2010,21(2):154 – 166.
- [8] Viterbi A J, Viterbi A M. Nonlinear estimation of PSK-modulated carrier phase with application to burst digital transmission[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29 (4):543 – 551.
- [9] 汪春霆, 沈业兵, 王爱华. 一种低 SNR 下 APSK 载波相 位盲同步方法[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(11): 1336-1354.

WANG Chun-ting, SHEN Ye-bing, WANG Ai-hua. APSK Blind Carrier Phase Synchronization Under Low SNR [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(11): 1336 – 1354. (in Chinese)

[10] Wu N, Wang H, Kuang J M, et al. Design and performance analysis of non-data-aided carrier phase estimators for amplitude and phase shift keying signals[J]. IET Communications, 2011,5(2):231-239.

#### 作者简介:

**徐 烽**(1979—),男,山东高密人,分别于2001 年和2004 年获成都理工大学工学学士学位和工学硕士学位,现为博士 研究生,主要研究方向为航天器通信技术;

XU Feng was born in Gaomi, Shandong Province, in 1979.

He received the B.S. degree and the M.S. degree from Chengdu University of Technology in 2001 and 2004, respectively. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns communications technology of spacecraft.

Email:cast\_xufeng@163.com

**邱乐德**(1964—),男,山东青州人,1986年于山东大学 获理学学士学位,1989年于中国空间技术研究院获工学硕士 学位,现为研究员、博士生导师,主要研究领域为航天器通信 技术;

QIU Le-de was born in Qingzhou, Shandong Province, in 1964. He received the B.S. degree from Shandong University and the M.S. degree from China Academy of Space Technology in 1986 and 1989, respectively. He is now a senior engineer of professor and also the Ph.D. supervisor. His research concerns communication technology of spacecraft.

**王 宇**(1973一),男,陕西靖边人,1995 年于电子科技 大学获工学学士学位,1998 年于中国空间技术研究院获工学 硕士学位,现为研究员、硕士生导师,主要研究方向为航天 器通信技术。

WANG Yu was born in Jingbian, Shaanxi Province, in 1973. He received th B.S. degree from University of Electronic Science and Technology of China and the MS degree from China Academy of Space Technology in 1995 and 1998, respectively. He is now a senior engineer of professor and also the instructor of graduate students. His research concerns communication technology of spacecraft.