

一种新的消除 V&V 算法载波相位模糊的方法

贺军 郭伟

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

摘要 V&V 算法非常适用于 PSK 突发信号的载波同步。该算法需要对估计出来的相位进行后续处理,以消除由剩余频差引起的相位模糊、避免跳周现象。该文提出了一种新的相位后续处理方法,不但能够消除由剩余频差带来的相位模糊,而且对于由噪声引入的相位模糊仍然非常有效。相对于已有的方法,该方法大大降低了信号发生跳周的概率。计算机仿真表明,该方法具有良好的性能,适用于对 MPSK 突发信号的解调。

关键词 V&V 算法, 跳周, 相位模糊, 载波同步

中图分类号: TN919

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)05-0836-04

A New Method for Eliminating the Carrier Phase Equivocation of V&V Algorithm

He Jun Guo Wei

(School of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract The V&V algorithm is very suitable for carrier synchronization of burst signal. After V&V algorithm, a post processing is needed for eliminating the phase equivocation which is brought by the residual frequency and the cycle slip can be avoided. In this paper, a new post processing method is put forward. It has a good effect on the phase equivocation brought by both residual frequency and noise. Contrast to some other methods, it reduces the probability of cycle slip greatly. Simulation results prove that this method had a good performance and can apply to the demodulation of MPSK burst signal.

Key words V&V algorithm, Cycle slip, Phase equivocation, Carrier synchronization

1 引言

对于高效、低速的卫星突发信号,没有载波同步码和定时同步码,突发一开始就是信号的独特码,这就要求信号的同步时间要非常短。常规的基于锁相环或滤波器的载波同步方法需要一定的收敛时间才能入锁,对于这类信号几乎无能为力。无辅助数据(Non Data Aided, NDA)的载波同步方法是一种前馈的盲估计算法。NDA 载波同步方法是不基于信号的,其同步速度非常快,几乎是一检测到信号就能入锁,所以特别适用于这类高效突发信号。

V&V^[1,2]算法是一种经典的NDA算法,它是载波相位的无偏估计,被广泛应用于MPSK突发信号的载波同步中。为了去除信号调制,V&V算法中对相位进行了 M 倍非线性运算,在恢复载波的过程中就需要将估计出来的相位除以 M 。由于相位的值域限制在 2π 的范围内,在相干解调中,恢复出来的载波可能存在 $2\pi/M$ 的相位模糊。所以,V&V算法需

要后续的消除相位折叠的处理^[3,4],以避免由载波的相位模糊导致的信号跳周。但是,由于随机噪声和剩余频差的存在,特别是在信噪比较低时,后续的消除相位折叠的方法经常出现错误,导致解调出来的信号跳周的概率较大,使误码率大大增加。

本文提出的消除载波相位模糊的方法,采用大数判决的原则,不仅大大降低跳周的概率,而且在信噪比较高、不出现跳周现象的情况下,误码率也有所下降。该方法已实际应用于新近开发的通信系统中。

本文第2节简要介绍了V&V相位估计器及已有的消除载波相位模糊的方法,分析了跳周现象产生的原因。第3节提出了基于大数判决原则的载波相位模糊消除方法。第4节对两种方法进行了计算机仿真,并给出了比较结果。最后是全文总结。

2 V&V 相位估计器及相位模糊消除方法

设经过定时同步、且每符号一个采样点的MPSK信号,输入到V&V相位估计器中,表示为

$$r(n) = \rho_n \exp[j(2\pi n\Delta fT + \theta + \theta_M + v_n)] \quad (1)$$

其中 ρ_n 为信号幅度, Δf 为残余的频率误差, T 为符号周期, θ 为初相, θ_M 为 MPSK 信号的调制相位, v_n 为噪声引入的相位。 $r(n)$ 经过非线性处理去除调制:

$$\begin{aligned} r'(n) &= x'_n + jy'_n = F(\rho_n) \exp[j(2\pi Mn\Delta fT + M\theta + M\theta_M + Mv_n)] \\ &= F(\rho_n) \exp[j(2\pi Mn\Delta fT + M\theta + Mv_n)] \end{aligned} \quad (2)$$

相位估计算法为

$$M\hat{\theta} = \arctan \left[\frac{\sum_{n=-N}^N x'_n}{\sum_{n=-N}^N y'_n} \right] \quad (3)$$

在工程实现中可以取 $F(\rho_n) = 1$, 这样既简化了实现, 又降低了前端 AGC 的负担, 且当信噪比大于 0 时, 其性能与 $F(\rho_n) = \rho_n^2$ 几乎一致。在文献[1,2]中, 分析了噪声和剩余频差对相位估计方差的影响, 并给出了其近似的相位方差表达式。

在一个突发中, $M\hat{\theta}$ 在总体趋势上是按照剩余频差的数值在慢变化。由于 $M\hat{\theta}$ 的值域被限制在 $[-\pi, \pi)$ 内, 如果一个突发中的符号数足够多时, $M\hat{\theta}$ 的值会越过边界, 折叠后又从另一边界开始变化^[3]。这样, 当 $M\hat{\theta}$ 产生相位折叠时 $\hat{\theta}$ 就会发生 $2\pi/M$ 的相位变化, 恢复出来的相干载波 $e^{j\theta}$ 出现不连续的情况, 造成解调后的跳周现象。

Fitz 在文献[3]中提出的相位后续处理方法是将其相位估计值映射到多个相邻的值域区间, 相邻的区间具有交叉重叠。相位的估计值 $M\hat{\theta}$ 在某个区间内变化, 当接近该区间的边界时, 估计值的值域自动切换到相邻的另一区间。该方法在一定程度上能够消除由剩余频差带来的相位不连续的情况。但当噪声和剩余频差同时存在、特别是当信噪比较低时, 由噪声引起的相位估计值的突变会造成频繁的不正确的区间切换, 同样带来跳周现象。这个时候, 区间切换方法的性能相当差。

Matlab 提供了一种 unwrap 函数, 不但能消除由剩余频差带来的相位折叠, 而且能够大大降低由噪声和频差同时存在时带来的不正确的区间切换的概率。与文献[3]中的方法相比, 该方法在总体性能上有较大的提高。文献[4]提出的方法与 unwrap 函数的原理一致。

设 $M\hat{\theta}(n) \in [-\pi, \pi)$ 为在 n 时刻时相位估计值, $M\theta(n) \in (-\infty, +\infty)$ 为 unwrap 函数去折叠后的相位估计值, 有 $M\theta(n) = M\hat{\theta}(n) + \psi(n)$, 其中 $\psi(n)$ 为去折叠补偿参数。其具体计算步骤如下:

- (1) 初始化, $\psi(0) = 0$, $M\theta(0) = M\hat{\theta}(0)$;
- (2) $n = n + 1$,

$$\psi(n) = \begin{cases} \psi(n-1) + 2\pi, & M\hat{\theta}(n) - M\hat{\theta}(n-1) < -\pi \\ \psi(n-1) - 2\pi, & M\hat{\theta}(n) - M\hat{\theta}(n-1) > \pi \\ \psi(n-1), & \text{其它;} \end{cases}$$

$$(3) \quad M\theta(n) = M\hat{\theta}(n) + \psi(n);$$

(4) 重复步骤(2)。

观察 unwrap 函数的计算步骤可以发现, 去折叠补偿参数 $\psi(n)$ 的变化仅仅由 n 和 $n-1$ 时刻的相位估计值差决定。当 n 时刻的随机噪声较大时, 相位的估计值差超过 π , 使 $\psi(n)$ 发生 2π 的变化。而在 $n+n_0$ ($n_0 \geq 1$ 且 n_0 为整数) 时刻之后, 该随机噪声消失, 前后相位估计值之差反向超过 π , 使 $\psi(n+n_0)$ 发生一个反向的 2π 变化。这样, ψ 就在 $n+n_0$ 时刻之后就恢复为 n 时刻之前的值, 载波相位也仅在 n 和 $n+n_0-1$ 时刻之间发生错误。

但是, 由于噪声具有较大的随机性, 其对相位估计值的影响有时并不对称。如果在 n 时刻估计值的差大于 π , 而在 $n+n_0$ 时刻估计值的差不一定反向超过 π , 这就使得 ψ 在 n 时刻发生一次 2π 的变化, 而在噪声消失的 $n+n_0$ 时刻 ψ 的值并不恢复, 使载波产生连续的错误(即相位模糊), 从而出现跳周现象, 如图 1(a)中的 p3 点。

unwrap 函数消除了 $M\hat{\theta}(n)$ 的相位折叠后得到线性变化的相位 $M\theta(n)$, 再除以 M 即得到载波相位估计值 $\theta(n)$ 。

3 基于大数原则的消除相位折叠方法

本文提出的基于大数原则的消除相位折叠的方法是直接估计载波 $e^{j\theta}$ 。直接对载波进行估计, 利用了载波变化的连续性, 即使相位发生了 2π 的变化, $e^{j\theta}$ 的值仍然是连续的。为降低由噪声带来的跳周概率, 当前时刻的载波 $e^{j\theta(n)}$ 不是仅由前一时刻的 $e^{j\theta(n-1)}$ 决定, 而是由前面 N (为奇数, 且 $N \geq 3$) 个时刻的载波估计值依照大数判决的原则来确定。

$$\text{设 } e^{j\phi_m} = \exp \left\{ j \left[\frac{M\hat{\theta}(n)}{M} + \frac{2m\pi}{M} \right] \right\} \text{ 为当前时刻 } n \text{ 的 } M \text{ 个}$$

可能的载波值之一, $\text{flag}(m)$ 为对应载波值的大数标志, 即每判断 $e^{j\phi_m}$ 出现一次, $\text{flag}(m)$ 就增加 1, 其中 $m = 0, 1, \dots, M-1$ 。具体计算步骤如下:

$$(1) \text{初始化: } e^{j\phi_m} = \exp \left\{ j \left[\frac{M\hat{\theta}(n)}{M} \right] \right\}, \text{ 当 } n = 0, 1, \dots, N-1;$$

$$(2) n = n + 1, \quad e^{j\phi_m} = \exp \left\{ j \left[\frac{M\hat{\theta}(n)}{M} + \frac{2m\pi}{M} \right] \right\}, \quad \text{flag}(m) = 0, \\ m = 0, 1, \dots, M-1;$$

(3) 计算 $R(m, k) = \text{Re}(e^{j\phi_m} e^{-j\hat{\theta}(n-k)})$, 对每一个 k ($k = 1, 2, \dots, N$) 值, 在 $m = 0, 1, \dots, M-1$ 中选择最大 $R(m, k)$, 其对应的 $\text{flag}(m)$ 加 1;

(4) $e^{j\theta(n)} = e^{j\phi_m}$, 其对应的大数标志 $\text{flag}(m)$ 最大, $m = 0, 1, \dots, M-1$;

(5) 重复步骤(2)。

相关函数 $R(m, k)$ 是当前时刻第 m 个可能的载波值与 $n-k$ 时刻载波值的相关函数。由于 V&V 算法前已经进行了载波频率校正, 剩余频差非常小, 载波的相位的变化也很小。

$$\text{相关运算等效为 } R(m, k) = \sum_{k=1}^N \cos \left[\frac{M \hat{\theta}(n)}{M} + \frac{2m\pi}{M} - \theta(n-k) \right].$$

如果相位差越小, $R(m, k)$ 就越大, 选取最大的 $R(m, k)$ 对应的 m 即为当前时刻的载波估计值 $e^{j\theta(n)}$ 。

该方法并不采用去折叠补偿参数 ψ , 避免了由 ψ 带来的载波连续错误。 n 时刻的载波估计值从当前 M 个可能的载波值中选择一个, 使其与前面 N 个时刻的载波估计值距离最小。

噪声在当前时刻使相位估计值的变化超过 π , 载波在该时刻出现错误。在后续时刻, 如果相位估计值不出现一个反向的 π 的变化, `unwrap` 函数就会使当前的载波错误引起连续的相位跳变。本文提出的方法中, 后续时刻的载波估计值不仅要与当前出现了错误的载波值进行比较, 而且还要与前面正确的载波值进行比较才能得到。只要 N 个进行相关的载波估计值中正确的个数大于发生了错误的载波值的个数, 当前的载波估计值就不会跳相。

图1为 `unwrap` 函数和大数判决法处理 V&V 相位估计值的示意图, 信号为 QPSK。图1(a)中的 p_1, p_2, p_3, p_4 4 点的相位估计值发生了折叠。 p_1 点是由于剩余频差的影响出现的单向相位折叠; p_2, p_3 和 p_4 为噪声引入的折叠。其中 p_2, p_4 的正向和反向折叠都超过了 π ; 而 p_3 点只有正向折叠超过了 π , 反向折叠变缓, 小于 π 。对于 p_1 点由频差引入的相位折叠, `unwrap` 函数和大数判决法都能正确消除; 对 p_2, p_4 由噪声引入的、双向大于 π 的折叠, 两种方法也能消除; 而对 p_3 点单向大于 π 的折叠, `unwrap` 函数会发生跳周现象,

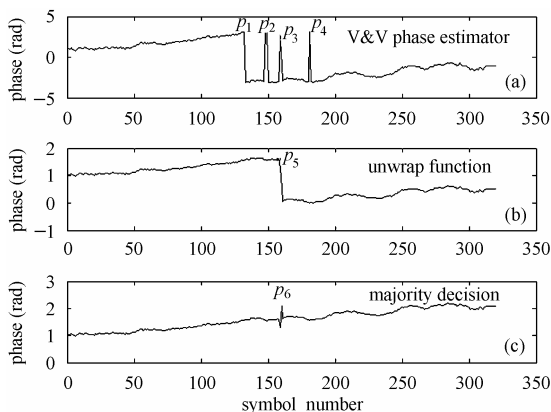


图1 跳周示意图

而大数判决法仅在该点产生一次误码(如图1(b)的 p_5 点, 图1(c)的 p_6 点)。

由于噪声带来的相位错误在整个突发中毕竟是少数, 根据上面的分析, N 的值取得越大, 发生跳周的概率就越小。对 MPSK 信号, 设 $\Delta F = \Delta fT$, 由判决准则, 要求当前时刻

载波相位相与前面 N 个时刻的相位变化都不大于 $2\pi/M$, 即

$$\theta(n) - \theta(n-k) = k \cdot 2\pi\Delta F < \frac{2\pi}{M}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\text{取 } k = N \text{ 有} \quad N < \frac{1}{2M\Delta F} \quad (5)$$

例如 QPSK 信号, 剩余频差 $\Delta F = 5\%$ (V&V 算法要求剩余频差最大不超过 5%), $N < 25$ 。

由于计算量随着 N 的增加成倍数增加, 且当 N 已经较大时, 再增加 N 其性能的改善并不明显, 所以 N 的值不能选得太大。

4 仿真结果

本文在计算机上仿真了 QPSK 突发信号。该突发由 640 个 bit 或 320 个符号构成。在仿真结果图中, 每一个节点跳周概率(P_c)的计算都采用了 100,000 个突发累积得到。图2, 图3中大数判决长度 $N = 11$ 。仿真结果表明, 在低信噪比下: 当剩余频差较小时, `unwrap` 函数与 Fitz 区间切换法性能基本相当; 当剩余频差较大时, Fitz 区间切换法跳周概率迅速增加, 性能急剧恶化。而大数判决法在各个测试点上都具有远远优于二者的性能。另外, 跳周概率随着大数判决的长度的增加而减小, 但在一定的长度之后, 其减小的概率并不明显, 如图4所示。

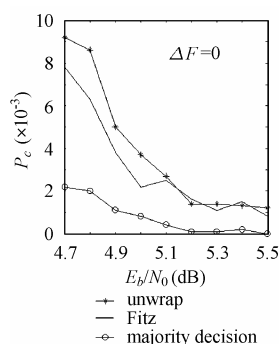


图2 3种后处理方法在噪声变化下的性能比较

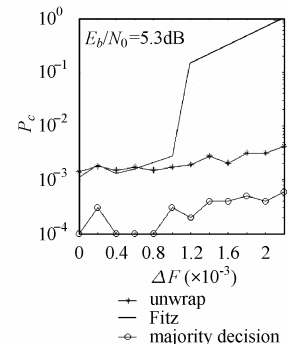


图3 3种后处理方法在频差变化下的性能比较

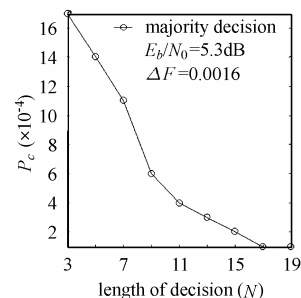


图4 跳周概率与判决长度关系

5 结束语

当信噪比较高时, 3种方法几乎都不产生跳周, 大数判

决法具有略好的误码性能。而当信噪比较低时,大数判决法在跳周和误码率等性能方面,明显优越于前二者。无论在计算机仿真、还是在实际通信系统中,该方法都表现出了非常好的效果。

当大数判决法的长度为 N 时,其计算中增加了 N 次复乘,但却省去了相位与正、余弦值之间的两次非线性转换,所以计算量的增加并不大。而由于该方法所有的计算都在载波值 $e^{j\hat{\theta}}$ 上进行,因而是线性的,硬件实现难度也不大。

参 考 文 献

- [1] Viterbi A J, Viterbi A M. Nonlinear estimation of PSK-modulated carrier phase with application to burst digital transmission. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1983, IT-29(4): 543 – 551.
- [2] Paden B E. A matched nonlinearity for phase estimation of a PSK-modulated carrier. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1986, IT-32(3): 419 – 422.
- [3] Fitz M P. Equivocation in nonlinear digital carrier synchronizers. *IEEE Trans. on Communications*, 1991, 39(11):1672 – 1682.
- [4] 郑大春, 项海格. 彻底消除相位检测中的 $\pm \pi$ 弧度跳变问题. *电子测量技术*, 1996, (4): 1 – 5.
- 贺 军: 男, 1972 年生, 博士生, 高级工程师, 研究方向为数字通信.
- 郭 伟: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会和中国通信学会高级会员,《通信学报》编委会委员,研究方向为网络优化设计及仿真技术、网络可靠性、自组网技术、信号检测与处理技术等.