

基于 DS-SS 信号相位特性的参数估计

朱孝武 唐斌

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 利用 DS-SS 信号符号间相位信息, 提出了一种可工作于低信噪比下的直接序列扩谱(DS-SS)信号噪声抑制方法。该方法在相参积累抑制噪声的同时, 还完整地保留了信号特征, 并实现 QPSK 信号的 I/Q 分量分离。结合参数估计方法, 可进行 DS-SS 信号载频和码速率估计。计算机仿真证明了该方法的有效性。

关键词: 直接序列扩谱信号, 噪声抑制, 相关, 相参积累

中图分类号: TN911.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)09-1425-04

A Novel Parameter Estimation Approach to the DS-SS Signal with Low Signal Noise Ratio

Zhu Xiao-wu Tang Bin

(School of Electronic Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract By exploring the phase information among symbols of the Direct Sequence Spread Spectrum (DS-SS) signal, a novel de-noising approach, used in low signal noise ratio environment, is presented. By coherent integration, this method can fully retain the signal characters and separate I/Q components of the QPSK signal while restraining noise. Combined with conventional parameter estimation methods, the carrier frequency and chip rate of the DS-SS signal can be estimated. Computer simulation confirms its effectiveness.

Key words Direct Sequence Spread Spectrum (DS-SS) signal, De-noising, Correlation, Coherent integration

1 引言

扩频信号参数估计在通信和电子侦察等领域中一直是研究热点。Reed^[1]提出了通过接收信号与自身延迟相乘得到符号速率谱线(率线)的位置可以估计信号的符号周期。Hill 等^[2]提出了平方倍频检测法, 通过对 BPSK 信号平方或绝对值变换使之成为 2 倍频信号从而消除了相位突变, 可以在较低信噪比(低于 -15dB)下对 BPSK 信号载频进行估计。文献^[3]利用直扩信号的谱相关特性估计信号的载频、码速率, 并可进行 MPSK 信号检测和调制识别, 是一种较为有效的估计方法, 由于采用二维搜索大大增加了计算量, 限制了其在实际工程中的应用。上述方法都是高斯白噪声前提下进行的。实际中, 受到接收机带宽、采样率限制和人为时域窄脉冲干扰的影响, 噪声往往非白, 且信噪比很低。在这样恶劣的环境下, 常规方法难以提取其参数信息。

常规的参数估计方法大多是基于 BPSK 信号进行研究的。原理上, QPSK 调制信号可以看成两路相互独立正交的 BPSK 叠加而成。因此对于低信噪比环境下 QPSK 信号, 迄今为止较为有效的参数估计方法多是将其 I/Q 分量分离或是

将信号平方^[2], 使其转换为二相信号, 然后进行处理。I/Q 分离需要产生严格同步的本地载波, 这在信号侦察中是比较困难的; 平方处理会造成信噪比恶化, 因此这类方法检测信噪比一般都不能做到很低。

为了进一步提高现有参数估计方法的性能, 可行的方法是先对信号作噪声抑制。目前较常用的噪声抑制方法有小波降噪^[4]、卡尔曼滤波^[5]和积累^[6-7]。前两种方法的滤波器在信号参数未知的情况下难以精确设计, 且抑制噪声的同时信号也或多或少地受到损失, 给后面的参数估计引入了误差。文献^[6]提出用相关积累法可以在很低的信噪比(-12dB)下估计 BPSK 信号的码速率。积累能够有效地抑制信号中的高斯噪声分量, 但是低信噪比下需要很长的积累时间, 计算量非常大。

文献^[8]提出利用符号周期和同步信息, 将信号等分为一个个完整的符号, 根据各符号的相位信息做相参积累, 可以避免积累中信号子段间的互相削弱, 进一步提高积累算法的性能, 大幅度提高信噪比以恢复 BPSK 信号扩频码序列。受该方法的启发, 本文提出符号积累方法并将其应用于载频和

码速率估计, 且实现了低信噪比下 QPSK 中频信号 I/Q 分量分离, 计算机仿真取得了良好的效果。

2 符号积累算法

2.1 BPSK 情况

假设接收到的 DS-SS BPSK 信号的符号周期已知, 符号周期与伪码周期相等, 且通过延时相乘法^[1]得到, 文中不考虑其误差带来的影响。此外, 假设采样频率和载频远大于符号频率 f_0 ($f_0 = 1/T_0$), 近似认为符号周期是载波周期的整数倍。

这样, 接收信号可以表示成为

$$x(t) = Ad(t)c(t)\cos(\omega t + \varphi) + n(t) \quad (1)$$

其中 $c(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j p(t - jT_c)$, $c_j \in \{1, -1\}$ 为 PN 序列; $d(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k p(t - kT_0)$, $d_k \in \{1, -1\}$ 为信息码序列; $p(t - kT) = \begin{cases} 1, & t \in [kT, (k+1)T] \\ 0, & t \notin [kT, (k+1)T] \end{cases}$ 代表子脉冲; A 为信号幅度; ω 为载频; φ 为初相; T_0 是符号周期; T_c 为码周期, 且 $T_0 = NT_c$, N 为扩频长度; $n(t)$ 为均值为零、方差为 σ^2 的高斯白噪声。除了符号周期 T_0 已知, 其它因素都未知。

将 $x(t)$ 从符号起始点分割为长度 T_0 的彼此间不重叠的时间片段, 即提取出多个完整的符号。对于第 k 和 $k+1$ 个符号, 有

$$\bar{y}_k = Ad_k c(t - kT_0)\cos[\omega(t - kT_0) + \varphi] + \bar{n}_k \quad (2)$$

$$\bar{y}_{k+1} = Ad_{k+1} c[t - (k+1)T_0]\cos[\omega(t - (k+1)T_0) + \varphi] + \bar{n}_{k+1} \quad (3)$$

由于 PN 序列 $c(t)$ 是周期 T_0 的循环序列, 且由假设 $\omega T_0 = 2k\pi$, k 为整数, 因此, 式(2)和式(3)的余弦部分相等。不考虑噪声因素, 两式差别仅取决于符号 d_k 和 d_{k+1} 的取值。

通过内积算法确定各个符号的相位信息, 利用各个符号之间同相相加, 反相相减, 就可以得到一个新的符号

$$\bar{y}_0 = \sum_{k=2}^L \text{sgn} \langle \bar{y}_1, \bar{y}_k \rangle \cdot \bar{y}_k + \bar{n}'_k \quad (4)$$

其中 $\text{sgn} \langle \bar{y}_1, \bar{y}_k \rangle = \begin{cases} 1, & d_1 \text{ 与 } d_k \text{ 同相} \\ -1, & d_1 \text{ 与 } d_k \text{ 反相} \end{cases}$, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 为内积符号, L 为累加符号数。

假设积累前信号的信噪比为

$$\text{SNR} = (A^2/2)\sigma^2 \quad (5)$$

由于积累过程中信号幅度得到叠加, 而噪声只是方差得到叠加, 这样 L 次积累后信噪比为

$$\text{SNR}' = 10 \lg \left(\frac{(LA)^2/2}{L\sigma^2} \right) = \text{SNR} + 10 \lg L \quad (6)$$

积累后信噪比提升了 L 倍。

2.2 QPSK 情况

上述符号积累方法运用于 QPSK 信号。假设接收的 QPSK 信号为

$$x(t) = \frac{A}{\sqrt{2}} d_i(t) c_i(t) \cos(\omega t + \varphi) + \frac{A}{\sqrt{2}} d_q c_q \sin(\omega t + \varphi) + n(t) \quad (7)$$

由 I/Q 两个 BPSK 成分相加而成。假设两正交支路的扩频码序列 $c_i(t)$, $c_q(t)$ 长度相等, 符号起始点也相同。从符号起始点开始分割, 与式(2), 式(3)类似, 得到第 k , $k+1$ 个符号分别为

$$\begin{aligned} \bar{y}_k &= \frac{A}{\sqrt{2}} d_{i,k} c_i(t - kT_0) \cos[\omega(t - kT_0) + \varphi] \\ &\quad + \frac{A}{\sqrt{2}} d_{q,k} c_q(t - kT_0) \sin[\omega(t - kT_0) + \varphi] + \bar{n}_k \\ &= d_{i,k} \alpha_i + d_{q,k} \alpha_q + \bar{n}_k \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{y}_{k+1} &= \frac{A}{\sqrt{2}} d_{i,k+1} c_i[t - (k+1)T_0] \cos[\omega(t - (k+1)T_0) + \varphi] \\ &\quad + \frac{A}{\sqrt{2}} d_{q,k+1} c_q[t - (k+1)T_0] \sin[\omega(t - (k+1)T_0) + \varphi] + \bar{n}_{k+1} \\ &= d_{i,k+1} \alpha_i + d_{q,k+1} \alpha_q + \bar{n}_{k+1} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $\alpha_i = (\sqrt{A}/2) c_i \cos[\omega t + \varphi]$, $\alpha_q = (\sqrt{A}/2) c_q \sin[\omega t + \varphi]$ 忽略噪声的影响, $\bar{y}_k + \bar{y}_{k+1}$ 可能出现表 1 所示结果:

表 1 QPSK 信号符号间叠加后取值分布

结果	概率	结果	概率
0	1/4	$-2\alpha_q$	1/8
$2\alpha_i$	1/8	$2\alpha_i + 2\alpha_q$	1/8
$-2\alpha_i$	1/8	$-2\alpha_i - 2\alpha_q$	1/8
$2\alpha_q$	1/8		

通过图 1 的系统将 α_i 或者 α_q 分离出来。设定合理门限, 通过能量判决分离出 $\pm 2\alpha_i$ 和 $\pm 2\alpha_q$, 利用相关检测进一步将 α_i 和 α_q 区分开, 而相关峰的符号包含了 u_k 和 u_l 间的相位关系。这样, 在输出端做相参积累, 可以得到 I/Q 分量的新符号。此时的信噪比有了一定的改善, 但不如 BPSK 符号积累那样显著, 这是因为 $\bar{y}_k + \bar{y}_{k+1}$ 结果出现 $\pm 2\alpha_i$ 或者 $\pm 2\alpha_q$ 的概率只有 1/4, 分量分离后丢失了一半信号能量。

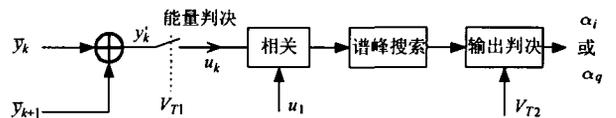


图 1 QPSK 信号的 I/Q 分量分离

图 1 中 V_{T1} 是能量判决门限, 根据最大后验概率准则得到

$$\begin{aligned} V_{T1l} &= \sigma_x^2 + \sigma_n^2 \cong \min \left[\sigma_{y_k}^2 \right] + \frac{1}{4} \left\{ \max \left[\sigma_{y_k}^2 \right] - \min \left[\sigma_{y_k}^2 \right] \right\} \\ V_{T1h} &= 3\sigma_x^2 - \sigma_n^2 \cong \max \left[\sigma_{y_k}^2 \right] - \frac{1}{4} \left\{ \max \left[\sigma_{y_k}^2 \right] - \min \left[\sigma_{y_k}^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 σ_x^2 为信号方差, σ_n^2 为信号分段叠加后各段的方差。 V_{T2} 为符号门限, 其值为 0。

符号同步是实现上述算法的关键。若分段位置不是符号起始位, 信号段中包含相位跳变点, 累加后信号的某些部分被削弱, 导致信号畸变。符号同步可以采用滑动自相关法^[9]

实现，即

$$r(i) = \frac{1}{N} \sum_j \sum_m x(m+i, j) x^*(m+i, j+M) \quad (11)$$

其中 M 为一个 PN 码周期的样点数， $m=0,1,2,\dots, M-1$ ； $i=0,1,2,\dots, M-1$ 代表每个 PN 码周期的采样点； $j=0, 1, 2,\dots, N-1$ 代表接收信号数据组数。要求每组数据大于或等于一周期 PN 码。

3 计算机仿真

为了检验算法的有效性，进行下面的计算机仿真。仿真参数如下：载频为 20MHz，采样频率为 100MHz，码速率为 3.1MHz，伪码长度为 1023，符号频率为 3.0303kHz。信号加入高斯白噪声后通过中心频率为 20MHz，带宽为 8MHz 的带通滤波器。图 2 是信噪比为 -12dB 的含噪 BPSK 信号功率谱。可以看出，由于信噪比很低，信号在频域上完全被噪声淹没。应用符号积累算法，经过 10 次符号积累的信号功率谱如图 3 所示。符号积累后信号的信噪比得到了较大的提高，高频窄带干扰得到有效抑制，计算得出此时的信噪比约为 -7.6dB，信噪比提升达到 4.4dB。但是这和式(6)得到的 10dB 的理论值还存在较大差距，具体原因将在图 11 中加以分析。

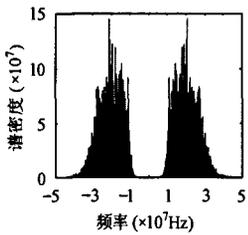


图 2 未经积累的信号功率谱

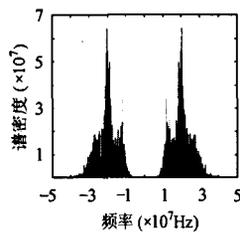


图 3 10 次符号积累后的信号功率谱

结合参数估计方法进一步研究算法在不同信噪比下的性能。取一段长度为 10 个符号长度，信噪比为 -15dB 的 BPSK 信号，分别经过长度为 1024 点的非相参积累和符号积累后用平方倍频法(FFT 点数 1024)估计信号载频；另取一段同样长度的信噪比为 -10dB 的 BPSK 信号，分别经过长度为 1024 点的非相参积累和本文的符号积累后用时域相关法估计码速率。实验结果如图 4 和图 5 所示。

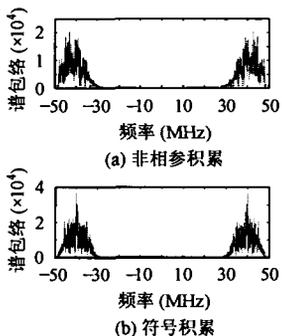


图 4 平方倍频法频率估计

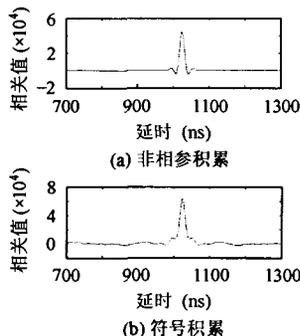


图 5 时域相关法码速率估计

从图 4 中非相参积累的结果看出，由于信噪比太低，很难搜索到信号的谱峰，此时载频的估计值为 21.532MHz，与理论上的 20MHz 偏差较大(1532kHz)。经符号积累处理后，谱峰非常明显，此时的估计值为 20.05MHz，误差为 50kHz，是较为精确的。图 5 中非相参积累得到的三角形畸变严重，经过最小二乘法拟合后码速率的估计值为 2.847MHz，与符号积累得到的 3.216MHz 相比，显然后者精确得多。

图 6~图 9 分别示出了 100 次 Monte-Carlo 实验计算出的 10 个符号周期的 BPSK 和 QPSK 信号经符号积累和 1024 点非相参积累后对载频和码速率估计的归一化均方根误差(NRMSE)随信噪比的关系曲线。

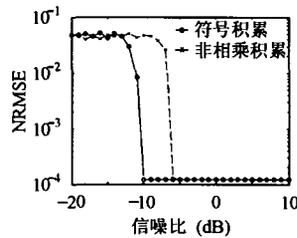


图 6 BPSK 信号载频估计的 NRMSE

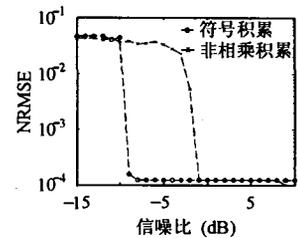


图 7 QPSK 信号载频估计的 NRMSE

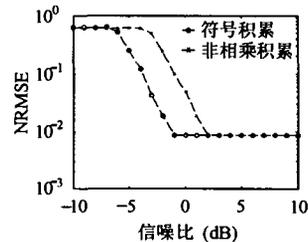


图 8 BPSK 信号码速率估计的 NRMSE

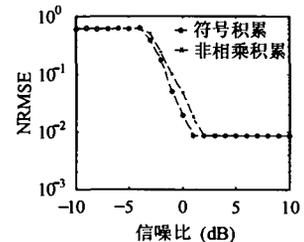


图 9 QPSK 信号码速率估计的 NRMSE

由图 6~图 9 可以看出，经过符号积累的信号信噪比的提升普遍优于非相参积累。图 6 和图 8 表明对于 BPSK 信号载频和码速率估计，符号积累相对于非相参积累信噪比得到 3~4dB 的性能改善。图 7 中对于 QPSK 信号载频估计信噪比改善达到了 9dB，这是由于符号积累实现了 QPSK 信号 I/Q 分量分离，避免了二次平方方法带来的信噪比损失。而图 9 中符号积累给 QPSK 码速率估计带来的性能改善不显著，这是因为算法在实现 I/Q 分量分离时丢失了一半的信号能量。实验中还发现，信噪比降低到 -10dB 以下时，由于此时 σ_x^2 和 σ_n^2 较为接近，门限 V_{T1} 难以满足要求，造成分离出的支路出现大量误码，影响了积累性能，导致符号积累的性能迅速恶化。I/Q 分量分离的误判概率曲线如图 10 所示。

图 11 为针对 BPSK 信号的符号积累性能随积累长度的变化曲线。由于仿真信号采用带内高斯白噪声，因此图中算法性能与理论值存在一定差距。由图可以看出随着数据长度

的增加, 积累性能有少许提高, 并逐渐趋于稳定, 这主要是采样速率倍数 f_s/f_0 非整数倍致使同步点不能精确定位, 多次积累后引起符号错位造成的。此外当信噪比下降到一定程度时符号同步算法将难以得到正确同步点, 限制了符号积累方法在更低信噪比下的应用。

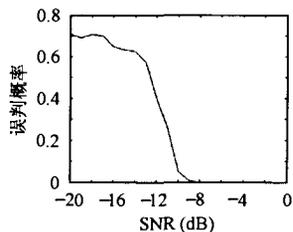


图 10 I/Q 分量分离的误判概率曲线

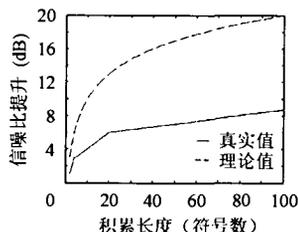


图 11 符号积累性能随积累长度的变化曲线(BPSK)

4 结束语

本文提出了利用符号积累提高 DS-SS 信号信噪比的方法, 成功将其运用到 DS-SS 信号的参数估计中, 提高了常规参数估计方法的噪声适应能力, 并结合平方倍频法和时域相关法研究了对信号载频和码速率估计的性能。仿真表明, 符号积累与非相参积累相比信噪比有一定程度的提高。由于符号积累能够实现 QPSK 信号 I/Q 分量分离, 因此在对 QPSK 信号进行参数估计时比非相参积累有更大的优势。受到符号同步算法性能和系统采样率的影响, 符号积累方法在更低信噪比下性能受限, 如何改进有待于进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Reed D E, *et al.*. Minimization of detection of Baud rate spectral lines by delay and multiply receiver. *IEEE Trans. on Comm.*, 1988, 1(36): 118 – 120.
 - [2] Hill D A, *et al.*. Experimental carrier detection of BPSK and QPSK direct sequence spread spectrum signals. *Milcom*, 1995, San Diego, CA USA, Vol.1, 362 – 367.
 - [3] Gardner W A. Signal interception: a unifying theoretical framework for feature detection. *IEEE Trans. on Comm.*, 1988, 36(8): 897 – 906.
 - [4] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding. *IEEE Trans. on IT*, 1995, 41(3): 613 – 627.
 - [5] Li Xiang, *et al.*. A noise reduction method for non-stationary noise model of SPECT sinogram based on Kalman filter. *IEEE, Nuclear Science Symposium Conference Record*, San Diego, CA USA, 2001, vol.4: 2134 – 2138.
 - [6] 孟建等. 直扩信号检测的相关积累技术. *电子对抗技术*, 2001, 16(2): 1 – 5.
 - [7] 孙永军等. 基于小波变换相干积累的微弱信号检测. *电子对抗技术*, 2003, 18(5): 7 – 10.
 - [8] 杨超斌等. 一种直扩通信信号快速检测识别方法. *电子学报*, 1999, 27(7): 89 – 91.
 - [9] 张天骢等. 一种 DS/SS 信号 PN 码序列估计的神经网络方法. *信号处理*, 1994, 17(6): 533 – 537.
- 朱孝武: 男, 1978 年生, 硕士, 现从事低截获概率信号分析与处理技术研究。
- 唐 斌: 男, 1964 年生, 博士(后), 教授, 博士生导师, 目前主要研究方向包括电子对抗技术及系统、雷达抗干扰能力提高、新一代移动通信系统中的多阵元收发技术及系统等。