

2022 秋季学期 DSP 大作业

---北斗导航卫星系统 B3I 信号捕获

北斗导航卫星系统已于 2020 年完成全球组网，正式播发 B1C、B1I、B2a、B2b 和 B3I 信号。这些信号的调制方式各不相同，能提供丰富的定位、导航和授时服务。本次大作业将以 B3I 信号的捕获为例，让同学们初探导航卫星信号处理。

一、背景

北斗导航卫星系统是典型的码分多址（CDMA）广播系统，每颗卫星播发的信号是一个调制到载波上的扩频信号。扩频信号可以看作按照一定的持续时间以方波的形式周期循环地播发一串伪随机（PRN）序列。不同卫星的扩频信号使用不同的 PRN 序列，这为接收机区分不同卫星提供了基础。

具体地，第 i 颗卫星播发的一个周期的 B3I 扩频信号 $c_i(t)$ 可以被表示为

$$c_i(t) = \sum_{n=0}^{N-1} b_i[n] p(t - nT_c) \quad (1)$$

$$p(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_c \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

其中， $\mathbf{b}_i = \{b_i[0], b_i[1], \dots, b_i[N-1]\}$, $N=10230$ 为该卫星使用的 PRN 序列， \mathbf{b}_i 中每个元素的取值只可能为 1 和 -1 两种可能， $T_c = 1/(10.23 \times 10^6)$ s 为一个码片长度， $p(t)$ 为长度为 T_c 的矩形脉冲。由(1)和(2)可知，B3I 扩频信号一个周期为 $N \times T_c = 1\text{ms}$ 。由此，第 i 颗卫星播发的 B3I 扩频信号 $s_i(t)$ 为

$$s_i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_i(t - n \cdot NT_c) \quad (3)$$

为了便于理解上述公式含义，图 1 给出了一个扩频信号的示意图。

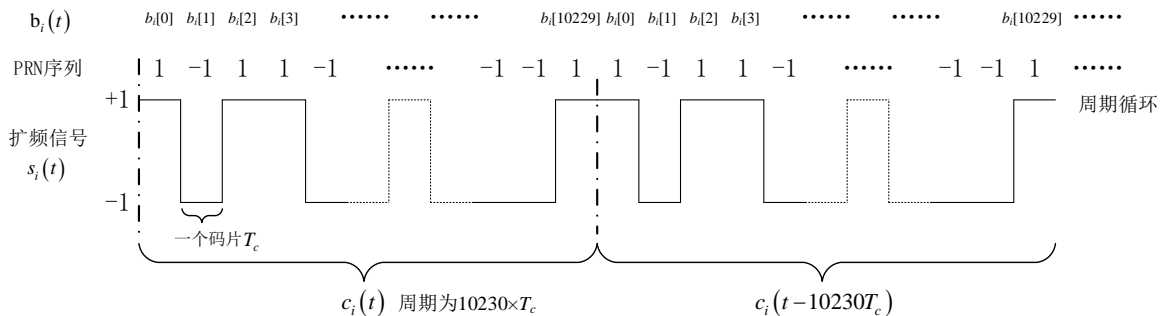


图 1: B3I 扩频码信号示意图

信号经过传输后，达到接收机天线，然后经过低噪放、下变频和滤波后，得到简化后的中频基带信号，如下表示：

$$s(t) = \sum_{i \in \mathcal{V}} A_i s_i(t - \tau_i) + w(t) \quad (4)$$

其中，下标 i 表示第 i 颗卫星， τ_i 表示每颗卫星信号的传输时延， A_i 表示接收信号功率， $w(t)$ 表示噪声，一般建模为高斯白噪声。 \mathcal{V} 表示接收机看到的所有卫星号的集合。接收信号 $s(t)$ 的示意图为：

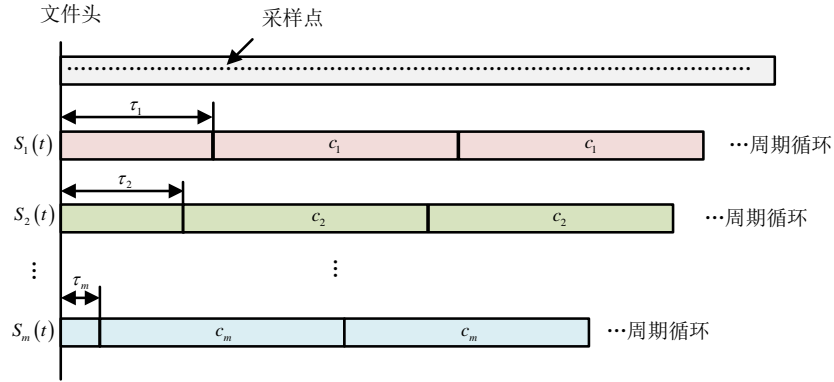


图 2: 接收信号示意图

接收机定位的第一步就是弄清这个混合信号 $s(t)$ 里面都包含哪些卫星的信号（也即 \mathcal{V} 的元素）以及每颗卫星对应的 τ_i （以采样点为单位）。这一过程称为扩频信号的捕获（Acquisition）。

接收机能利用的已知信息包括：

（1）已知所有北斗卫星的 PRN 序列 \mathbf{b}_i , $i=1,2,\dots,63$ （附件 B3I_Codes.mat 中提供了 63 颗卫星的 PRN 序列,每个序列的长度都是 10230,在 mat 文件中以 63×10230 矩阵形式存储）。

（2）已知不同卫星的 $c_i(t)$ 具有如下良好的相关特性：

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} c_i(\tau) c_i(\tau - t) d\tau = Q(t) \\ \int_{-\infty}^{+\infty} c_i(\tau) c_j(\tau - t) d\tau \approx 0, \quad i \neq j \end{cases} \quad (5)$$

其中 $Q(t)$ 的形状如下图所示，当 $t \in (kNT_c - T_c, kNT_c + T_c)$ 时呈现一个等腰三角形，在 $t = kNT_c$ 时取到峰值，且此峰值会明显高出噪底，而在其它 t 取值下 $Q(t) \approx 0$ ，其中 k 是任意整数。

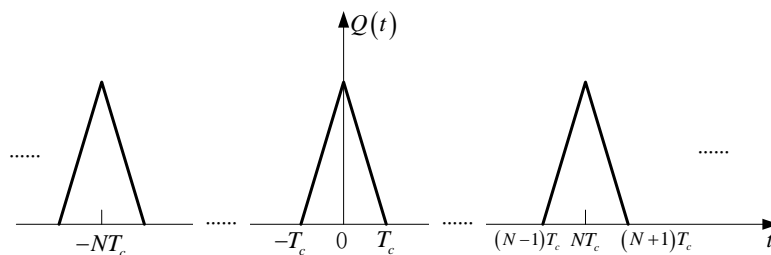


图 3: $c_i(t)$ 自相关函数示意图

二、任务

本次 Project 的任务就是基于上述背景知识介绍,结合本课程内容和参考文献[1] 6.6 节、6.9 节、6.11 节相应内容,在离散信号域设计并实现对北斗卫星导航系统扩频信号的捕获算法。

1. 任务 1: (10 分)

接收机在获得 $S(t)$ 后,会将其采样成离散序列 $S[n] = S(nT_s)$, 其中 $T_s < \frac{T_c}{2}$ 而且 T_s / T_c 必须为无理数。请通过详细的分析论证,设计出一套你认为最优的由序列 $S[n]$ 估计 ν 中所包含的所有元素(可见卫星编号)的算法,并估计每颗可见卫星对应的码相位时延(以采样点为单位)。尽可能提高检测的准确性,同时降低算法的实现复杂度(计算量和存储量),并给出必要的分析。

提示:

- 时域做相关等于频域...?
- $S[n]$ 和本地 PRN 序列采样率不一致该如何做相关?
- UEQ_rawFile_int16_Task1.dat 包含编号为 1 的卫星播发的信号,可用来对所设计的程序进行初期测试

2. 任务 2: (10 分)

请使用 MATLAB 或者 C/C++ 实现你在任务 1 中所设计的算法,让程序自动判别附件 UEQ_rawFile_int16_Task2.dat 文件中的数据包含了哪几颗卫星播发的信号,输出对应的卫星序号、对应的码相位时延以及消耗的总时间。

提示:

- 各卫星信号强度 A_i 是不同的,需要考虑如何从接收信号中估计出弱信号的卫星编号和对应的码相位。

三、 作业要求

- 1、大作业请直接在网络学堂提交。提交时要求包含研究报告及源代码。提交时注意保证代码的完整性，并应进行详细注释以保证可读性，并方便核查。同时，在提交代码里写一个 Readme 文档，用于说明代码的功能和使用方法。
- 2、研究报告 **只接受 PDF 格式**，中英文不限，但须为本人独立完成。
- 3、研究报告内容应详实，能充分体现本人在算法的设计、优化和实现中的探索、分析和思考过程，报告内容应以文字、公式、图表、流程图等为主体。如没有确实的必要性，不要在研究报告中大段粘贴源代码。**报告需要明确给出是否捕获到卫星、捕获卫星的编号及码相位时延的结果。**
- 4、提交的源代码要与报告中所提出的方法对应，需保证你提出的方法是你可以用程序实际实现的，并且可以顺利、正确的运行。
- 5、本Project没有标准答案，即使是实际工程上也不存在一种绝对最优的解决方案。因此强烈鼓励创新。对具有创新性想法和内容的设计，只要想法合理、分析论证充分，均给予适当加分。
- 6、作业应独立完成，杜绝抄袭。研究报告或代码会统一采用学校的查重系统完成查重，一经发现抄袭现象，无论抄袭者还是被抄者一律计0分。源代码运行结果与报告中结果不一致且报告中无任何解释说明，也属于学术不端。
- 7、如有任何关于本次大作业的问题，请联系课程助教漆耘含 qyh20@mails.tsinghua.edu.cn。

《清华大学学生纪律处分管理规定实施细则》第二十一条

有下列违反课程学习纪律情形之一的，给予警告以上、留校察看以下处分：

- （一）课程作业抄袭严重的；
- （二）实验报告抄袭严重或者篡改实验数据的；
- （三）期中、期末课程论文抄袭严重的；
- （四）在课程学习过程中严重弄虚作假的其他情形。

四、 附件说明

- 1、附件 B3I_Codes.mat 中提供了 63 颗北斗卫星的本地 PRN 序列 \mathbf{b}_i ， $i=1,2,\dots,63$ ，每个序列的长度都是 10230，在 mat 文件中以 63×10230 矩阵形式存储，可供使用)；
- 2、附件 UEQ_rawFile_int16_Task1.dat 是一组以 51.15MHz 采样率采得的持续时间为 100ms，用 int16(short)型存储的测试数据，其中包含编号为 1 的卫星播发的信号，可用来对所设计的程序进行初期测试；

- 3、 UEQ_rawFile_int16_Task2.dat 中给出了一组以 51.15MHz 采样率采得，用 int16(short)型存储、持续时间按为 1s 的信号数据，用于完成任务 2。

此外我们给出在 MATLAB/C/C++环境下，读取信号数据时所使用的代码，以供大家参考：

MATLAB 版：

```
fid = fopen('dataPath', 'r');  
[data, count] = fread(fid, dataLen, 'int16');
```

C/C++ 版：

```
FILE *fp;  
fp = fopen("dataPath", "rb");  
fread(data, dataLen, sizeof(short), fp);
```

五、 参考文献

- [1] 郑君里，杨为理，应启珩. 信号与系统（上册）第三版，高等教育出版社，2011
- [2] 谢钢. GPS 原理与接收机设计. 电子工业出版社. 2017.
- [3] G. X. Gao, A. Chen, S. Lo, D. D. Lorenzo, and P. Enge, "Compass-M1 broadcast codes and their application to acquisition and tracking", in Proceedings of ION NTM 2008, San Diego, CA, USA, Jan., 2008
- [4] G. X. Gao, A. Chen, S. Lo, D. D. Lorenzo, T. Walter, and P. Enge, "Compass-M1 broadcast codes in E2, E5b, and E6 frequency bands", IEEE Journal of selected topics in signal processing, 2009, 3(4): 599-612
- [5] Zhou, Bi-lei & Yu, Bao-guo & Luo, Wei-xiong. (2008). A new approach for pulsed pseudolite signal acquisition using FFT. 2909 - 2912. 10.1109/ICOSP.2008.4697755.