

北斗系统扩频信号捕获

数字信号处理第一次大作业

无 47 刘前* 2014011216

2016 年 12 月 5 日

摘要

本文基于快速傅里叶变换 (FFT, Fast Fourier Transform), 设计并实现了北斗系统扩频信号的时域相关捕获算法, 核心思想是计算卫星的 PRN 序列与接收信号之间的互相关。同时, 对算法中有关采样数据的预处理、判决门限的选取以及降低计算复杂度等问题提出了较为完善的解决方法, 通过仿真实验, 从准确性、计算量和存储量的角度验证了算法得到一定的优化。另外, 在此算法基础之上还采用累计相关的思想, 设计了一种针对弱信号的捕获算法, 捕获准确率略有提高。

*清华大学电子工程系 (E-mail: liuqian14@mails.tsinghua.edu.cn)

目录

1 背景介绍	4
2 基本概念	4
2.1 扩频信号基本原理	4
2.2 扩频信号捕获	5
3 问题描述	6
3.1 已知信息	6
3.2 实现目标	7
4 基于 FFT 的相关捕获算法	7
4.1 设计思路	7
4.2 算法描述	8
4.3 算法分析与优化	9
4.3.1 实验数据的预处理	9
4.3.2 采样信号的恢复	10
4.3.3 判决门限的选择	11
4.3.4 降低算法的复杂度	12
4.4 算法仿真结果	15
5 针对弱信号的相关捕获算法	15
5.1 弱信号的影响因素	16
5.1.1 多径效应	16
5.1.2 噪声干扰	16
5.2 算法描述	16
5.3 算法实现与分析	17
6 结论	17
7 附录	18
7.1 时域（离散）相关定理及证明	18

7.2 基于 FFT 的相关捕获算法—算法描述	19
7.3 代码清单	20
8 参考文献	21

1 背景介绍

北斗卫星定位导航系统是我国独立研发的全时段全地区覆盖卫星定位导航系统，是国家战略发展的重要部分，为我国军事、农业、交通等行业提供了良好的定位导航和授时服务，目前已经从以亚太地区为中心发展为全球覆盖的全时段定位导航系统。[1]

北斗卫星导航系统是个典型的 CMDA(Code Division Multiple Access, 码分多址) 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。在实际应用中，地面上的导航仪会同时接收到来自于多颗北斗卫星的信号，这些信号在时域上混叠在一起，因此需要弄清这个混合信号里面都包含哪些卫星的信号以及这些卫星对应的传播延迟，这一过程称为扩频信号的捕获 (Acquisition)。[2]

本文基于以上背景，尝试设计出对卫星扩频信号的捕获算法，尽可能提高检测的准确性，同时也要降低算法的实现复杂度。

2 基本概念

2.1 扩频信号基本原理

北斗系统每颗卫星播发的信号实际是一个调制到载波上的扩频信号，因而属于扩频通信。为简便起见，本文对实际的北斗信号进行了简化。用 $s_i(t)$ 表示第 i 颗卫星播发的信号，扩频信号可以看做按照一定持续时间以方波形式周期循环地播发的一串伪随机 (PRN, pseudo random) 序列。扩频通信的主要原理是：在发送端把要发送的信号与一个 PRN 序列相乘进行调制，在接收端使用相同方法产生相应的信号副本进行解扩，其主要目的是进行抗干扰。

已知每颗北斗卫星所使用的 PRN 序列内容都不相同，序列元素的取值都只有 1 和 -1 两种可能，而且序列的长度都是 $N = 2046$ 。把第 i 颗卫星的 PRN 序列记为 $\mathbf{b}_i = \{b_i[0], b_i[1], \dots, b_i[N-1]\}$ ，那么这颗卫星的扩频信号数学表达式可以写为：

$$s_i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_i(t - nT_c)$$

其中,

$$T_c = 1/(2.046 \times 10^6)s$$

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

$$p(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_c \\ 0, & elsewhere \end{cases}$$

为了便于理解上述公式的具体含义, 图1给出了扩频信号的示意图。

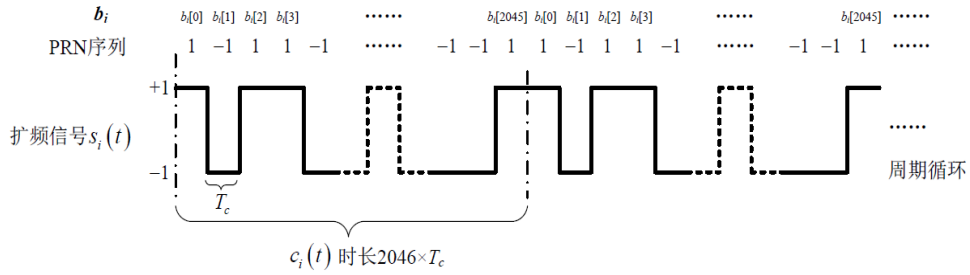


图 1: 北斗扩频码信号示意图

2.2 扩频信号捕获

地面上的导航仪会同时接收到来自多颗北斗卫星的信号, 这些信号在时域混叠在一起, 总的接收到的信号是

$$r(t) = \sum_{i \in \gamma} A_i s_i(t - \tau(i)) + n(t)$$

其中, γ 表示导航仪头顶所有可见卫星的编号集合, A_i 表示收到的第 i 颗卫星的信号幅值 (每颗卫星信号衰减不同), τ_i 表示第 i 颗卫星信号的传播延迟 (每颗卫星与导航仪的距离不同), $n(t)$ 表示导航仪收到的噪声干扰, 一般可视为高斯白噪声。

导航仪定位的第一步就是弄清接收到的混合信号 $r(t)$ 里面包含哪些卫星的信号, 也就是 γ 的元素, 以及每颗卫星对应的 τ_i , 这一过程由信号的捕获来实现。

3 问题描述

3.1 已知信息

在进行扩频信号的捕获之前，导航仪能够利用的已知信息主要包括：

(1) 所有北斗卫星的 PRN 序列 $\mathbf{b}_i, i = 1, 2, \dots, 37$ ，每颗卫星的 PRN 序列长度都是 2046;

(2) 不同卫星的 $c_i(t)$ 具有如下良好的相关特性：

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

其中 $Q(t)$ 形状如图2所示，当 $t \in (kNT_c, kNT_c + T_c)$ 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。

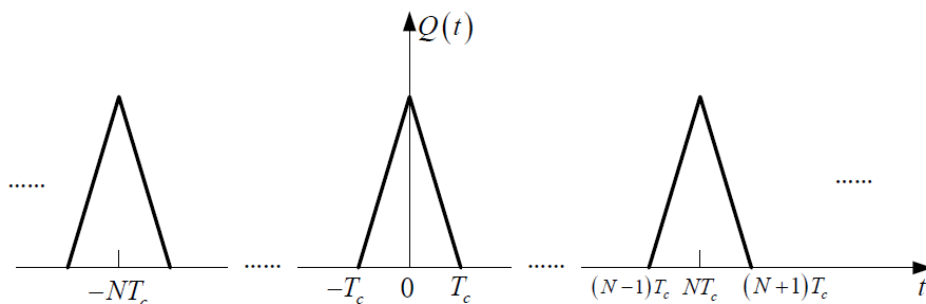


图 2: c_t 自相关示意图

本次大作业提供的数据为：

(a) 37 颗北斗卫星的 PRN 序列 $\mathbf{b}_i, i = 1, 2, \dots, 37$ ，每个序列的长度都是 2046;

(b) 测试数据：一组以 10MHz 采样率采得、用 int16(short) 存储的数据，其中包含编号为 15 的卫星播发的信号，可用来对设计的算法和程序进行初期测试;

(c) 实验数据：一组以 10MHz 采样率采得、用 int16(short) 型存储的信号数据，其中包含的卫星信号数目和编号均未知，需要通过设计的算法和程序得到。

3.2 实现目标

基于上述背景知识介绍，本文的目标是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，具体分为以下两个任务：

任务一

导航仪接收到信号 $r(t)$ 后，会将其采样成离散序列 $r[n] = r(nT_s)$ ，其中 $T_s < \frac{T_c}{2}$ 且 T_s/T_c 必须为无理数。本文需要通过详细的分析论证，设计出一套主观认为最优的由序列 $r[n]$ 估计 γ 中所包含的所有元素（可见卫星编号）的算法，尽可能提高检测的准确性，同时（从计算量和存储量两个角度）降低算法的实现复杂度。

任务二

给出一组以 10MHz 采样率采得的 $r[n]$ ，其中混叠了若干颗北斗卫星的扩频码信号。使用 MATLAB 实现任务一中设计的算法，让程序自动判别这个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。

4 基于 FFT 的相关捕获算法

4.1 设计思路

不同卫星的扩频信号序列之间时域相关性很弱，而同一卫星的 PRN 序列在某些特定时刻相关性很高，这一点在后文的图9也进行了验证。根据这一特点，尝试使用时域相关的方法检测输出信号中是否包含某一卫星的信号。

由于目前已有的数据是对导航仪对总接收信号的采样，因而在进行相关计算之前，需要将本地码与接收信号的采样值进行时域上的对应，即对应到相同的时间长度，称为“实验数据的预处理”，之后再进行相关。将采样数据与已有 PRN 序列对应的具体方式将在侯芬算法分析与优化的“采样信号的恢复”部分给出。

根据上述思路,算法的核心是“相关”。相关可以从两个角度进行计算,一种是直接定义利用离散卷积在时域进行计算,另一种方法则先利用 FFT 分别计算出 PRN 序列和接收信号(预处理后)的频域表示,相乘后再使用 IFFT 得到时域的相关值,在附录部分进行了详细的推导证明 [3]。根据分析,FFT 的计算复杂度远低于时域卷积计算,这一点在后文**算法分析与优化的**“降低算法复杂度”部分有细致的解释,因而基于 FFT 的算法模型已经初步形成。当相关函数中有非常明显的高峰时,或者高于某一阈值(判决门限),即可判断接收信号中包含对应的卫星信号。

同时,使用相关还能够得到不同卫星扩频信号的传播延迟,只需记录时域相关中最大值对应的时间,根据卫星扩频信号之间良好的相关特性,即可得到不同卫星间的相位差或者传播延迟。[4]

4.2 算法描述

按照之前的思路,可以设计得到图3所示的算法流程图,具体的算法描述详见附录部分的算法1。

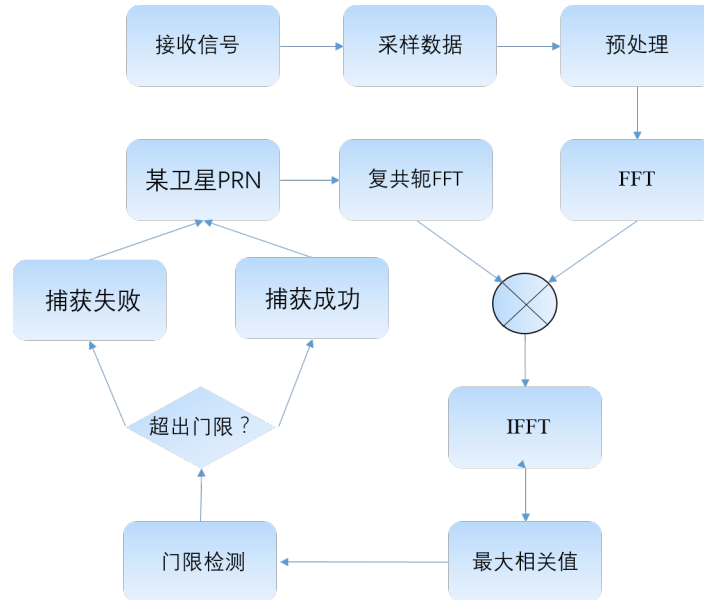


图 3: 基于 FFT 的相关捕获算法流程图

4.3 算法分析与优化

上述描述只是形成了基本的思路和模型，仍然有一些问题尚未解决，主要包括：

- (1) 如何预处理接收信号的采样数据？
- (2) 如何根据采样信号恢复原信号？
- (3) 如何选择判决门限才能保证结果的准确性？
- (4) 如何尽可能地减少算法的复杂度？

下面将以大作业提供的数据为例，对这些问题进行分析并给出个人的解决方案。

4.3.1 实验数据的预处理

本次大作业提供的实验数据以 10MHz 对 2s 的接收信号进行了采样，数据总长度为 20,000,000。由于卫星的扩频信号一个码元的时间为 $T_c = 1/2.046 \times 10^6 \text{s}$ ，而本地码的长度为 $\text{CodeLength} = 2046$ ，所以播发一次完整的扩频信号需要时间 $T_p = \text{CodeLength} \times T_c = 2046 \times \frac{1}{2.046 \times 10^6} = 10^{-3} \text{s}$ ，所以每秒钟共播发了 1000 个周期的扩频信号。因为每秒接收的信号采样后数据长度为 10,000,000，所以一周期的扩频信号共采样得到 10000 个数据，即长度为 2046 的 PRN 序列在采样后对应的数据长度为 10000。

根据扩频信号的原理，卫星的扩频码信号是循环播发的，对每个卫星都是如此。不考虑噪声时，每个卫星播发的信号都是周期信号，因而时域叠加后的信号也是周期信号，且周期与单个卫星播发信号的周期相等。据此结论，理想情况下，对输出信号采样得到的数据应该以 10000 为周期重复。但实际上由于存在着噪声因素的影响，所以直观上看采样数据是非周期的。为了减少计算量，暂时认为采样的数据是周期的，这样进行处理时，只需对 2000 个周期的数据进行求和平均，对应到一个长度为 10000 的数据，并将其作为单周期扩频信号的采样结果进行处理。

上述方法得到的长度为 10000 的数据是对 PRN 序列扩频信号的采样信号，但数据长度 10000 并不是 PRN 序列长度 2046 的整数倍，所以在进行相关计算之前，还需要考虑如何将长度为 10000 的采样信号恢复成长度为 2046 的信号。

4.3.2 采样信号的恢复

由于扩频信号具有方波的形式，所以理想情况下，同一段方波内采样的得到的数据是相等的，这样只需从采样的数据中间隔选取 2046 个数值作为该码元周期对应的数值即可。在这种情况下，按照算法1得到的实验结果如图4所示，已经基本能够看出有哪些卫星，但是对于个别卫星 (比如 2 号、8 号和 18 号卫星)，仅从图中无法明确地判定接收信号中有没有它们的信号，这就很有可能导致误判的发生。

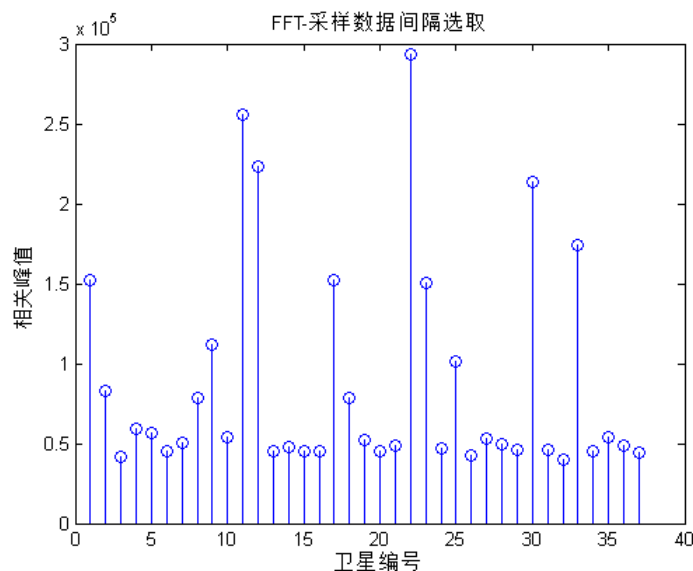


图 4: 基于 FFT 的采样数据间隔选取的方法

经过分析，原因就出在实际接收的信号是有噪声的，所以间隔选取的数值可能恰好采样到噪声较大的时刻，导致选取的信号与卫星的扩频信号相关性急剧减弱，导致被误判为不存在该卫星，尤其是对于距离较远、衰减较大的卫星信号，受到噪声的影响会更大。

因此，这种方法不够完善，需要进一步的优化。联想到之前取均值处理的方法，认为在这里仍然使用。在噪声功率未知的情况下，取均值是一种较为常见的处理方法，因为取平均可以很好地利用高斯噪声自己相消的特性，从统计意义上来说使得结果受到噪声的影响减小。所以，新的思路继续使用

取均值的思想：先将 10000 个数值对应到 2046 个区间，再对每个区间内的结果求平均值，最终得到长度为 2046 的接收信号。

自己编写的 MATLAB 函数 SampleMatchCode 即实现了这一功能，其中还添加了参数 bias, 微调 bias 可以调整采样点在一个码元周期内对应的位置。

以上基本实现了将采样数据的长度由 10000 整合为 2046，之后即可进行 FFT 等后续计算。图5展示了新方法下的结果，可以看出，之前图4中模棱两可的几个卫星信号已经可以确定包含在接收信号中。

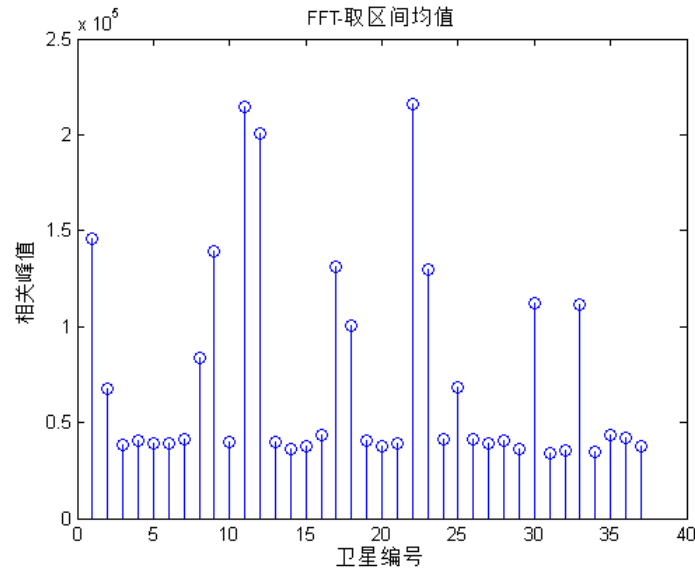


图 5: 基于 FFT 的取区间均值方法

4.3.3 判决门限的选择

判决门限用于确定接收到的信号中含有哪些卫星播发的信号，门限的选择会直接影响到扩频信号的捕获效果。[5] 中指出，对于单次试验，门限一般根据可接受的单次试验虚警概率 (FAP, False Alarm Probability) P_{fa} 确定。当虚警概率 P_{fa} 确定时，单次试验的判决门限值为：

$$V_{th} = \delta_n \sqrt{-2\ln P_{fa}}$$

式中 δ_n 为噪声功率。

但是对于本次大作业，噪声功率未知，而且虚警概率也很难或者无法计算，因而判决门限的选择只能另辟蹊径。

考虑将 37 颗卫星的 PRN 序列均与处理后的接收信号（长度为 2046）作基于 FFT 的相关，并且设置统一的判决门限。根据已知信息，某个卫星的扩频信号和其他 36 个卫星扩频信号的相关性基本相同，即相关函数的最大值比较接近，而且数值都比较小。具体来说，假设接收信号中不包含卫星 i 和 j ，那么卫星 i 和 j 与接收信号的相关函数的最大值也应该满足小并且互相接近的特点。

根据上述分析，设 37 颗卫星 PRN 序列与处理后的接收信号（长度为 2046）的相关函数的最大值存储在向量 cor 中， cor 中越小的元素对应的卫星信号越不可能存在于接收信号中，因而先将 cor 中元素从小到大排序得到 sortcor ， sortcor 中每个元素与前一元素作比值，比值小于某一范围（这个范围相对容易选取）则表明该卫星同样不可能存在，当比值超出某一范围时，则认为该元素对应的卫星信号与接收信号的相关性较强，选择前一元素的数值为统一的判决门限，相关峰值高于该判决门限的卫星即表明其播发的信号存在于接受的信号中。

针对测试数据，图7显示了上述方法选择判决门限的效果，可以看出，选择的判决门限非常合理，而且能够准确地找到卫星。针对实验数据，图8显示了选择判决门限的效果，同样能够准确地找到卫星。至此，门限的选择问题得以解决。

4.3.4 降低算法的复杂度

前文提到过，相关的计算可以直接从时域通过卷积进行计算，也可以使用 FFT 计算。但是，两者的时间复杂度相差很大，尤其是对于序列特别长的情况，FFT 计算效率比时域卷积计算高很多。下面进行简要分析：

设 $x[n]$ 和 $y[n]$ 是两个长度均为 N 的序列，两个信号的相关函数在时

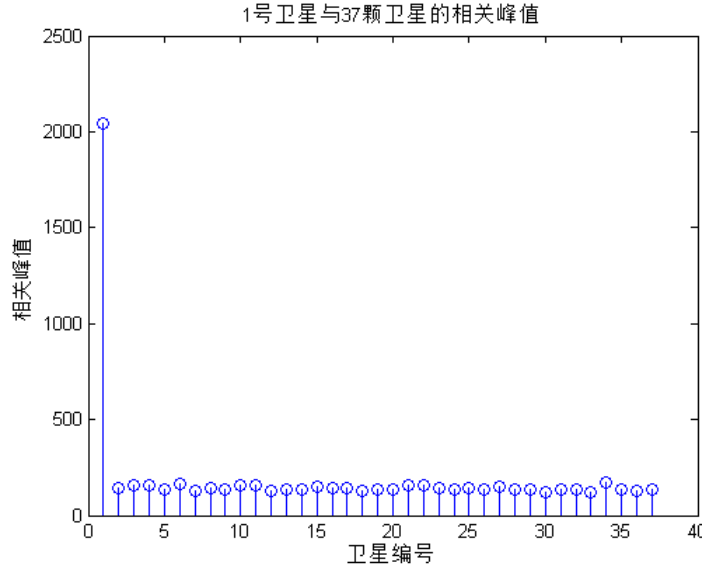


图 6: 1 号卫星与 37 颗卫星的相关峰值

域表示为:

$$r[n] = \sum_{m=0}^{N-1} x[m]y[n+m]$$

相关函数在频域表示为 (证明详见附录):

$$R[k] = X^*[k]Y[k]$$

直接在时域计算 $x[n]$ 和 $y[n]$ 的相关时, 需要的复乘和复相加均正比于 N^2 ; 而对于 FFT, 整个计算过程复乘次数为 $\frac{3N}{2}\log N + N$, 复加运算次数为 $3N\log N$ 。

对于存储量, 选取的衡量标准是程序运行中用到的所有中间变量的总大小。由于原始数据文件较大, 因而不考实验前提供的原始数据。

对于 $N = 2046$, 可以得到如表1所示的结果。表中数据表明, 通过频域下 FFT 序列相乘计算代替了时域下大量庞杂的计算, 可以大大降低算法的时间复杂度。

除了相关的计算方法能够大大降低计算复杂度之外, 还有一个重要的因素即为采样数据的长度。在前文中我们将采样得到的长度为 20,000,000 的

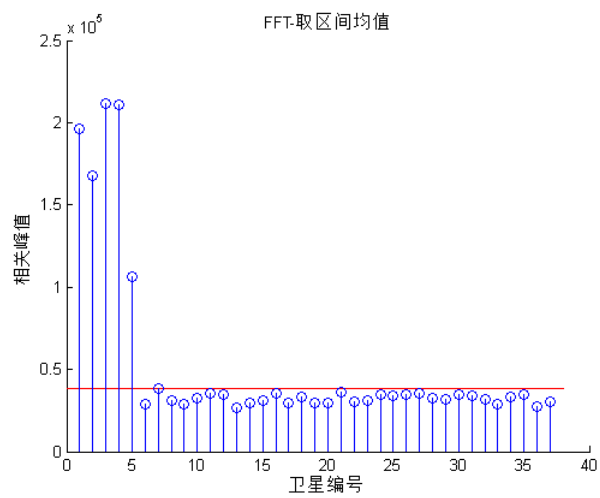


图 7: 基于 FFT 的相关捕获算法-测试数据

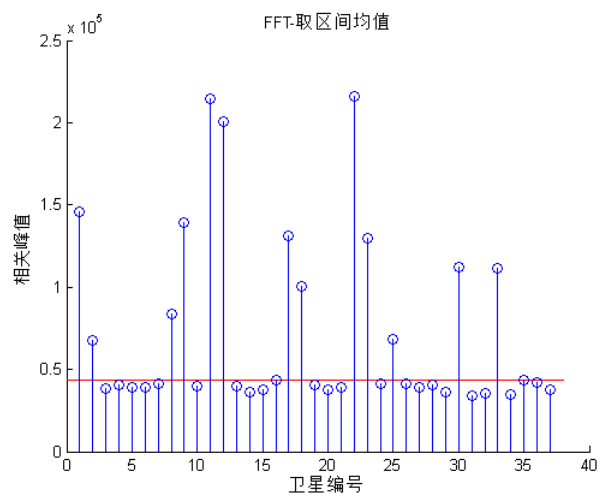


图 8: 基于 FFT 的相关捕获算法

相关的计算方法	复乘次数	复加次数	存储量
FFT 频域计算	1.8×10^4	6.7×10^4	24.2MB
时域直接法	4.2×10^6	4.2×10^6	40.2MB
两者比值	0.43%	1.59%	60.2%

表 1: 相关的两种计算方法-算法复杂度比较

数据处理为长度为 2046 的序列 (可以认为是数据的降维或压缩), 这样处理虽然能够一定程度上减小噪声的影响, 但是仍然不可避免地丢失掉了一些数据的信息。在保证结果正确率不降低或者降低不大的情况下, 通过使用统计量 (比如本次大作业使用的均值) 代替原始数据, 对降低计算复杂度是很有必要的。

4.4 算法仿真结果

以下运行结果是在 MATLAB R2014a(电脑处理器为: Intel i5-4210U CPU@1.7GHz; 内存为 4.00GB) 的环境下得到的。

算法	对于测试数据	对于实验数据	运行时间
时域直接相关	正确	结果确定	49.6s
FFT 方法 (间隔选采样数据)	正确	个别无法确定	0.670s
FFT 方法 (采样数据的均值)	正确	结果确定	0.874s

表 2: 不同算法结果比较

从表2中可以看出, 在使用采样数据的均值代表接收信号时, 基于 FFT 的相关捕获算法的正确性的计算效率都较优。

5 针对弱信号的相关捕获算法

本文之前设计了基于 FFT 的相关捕获算法, 对卫星信号的捕获效果已经基本符合本次大作业的要求, 不仅检测准确性高, 而且计算量和存储量都较低, 因而整体性能较好。但是, 仍然存在若干卫星的信号与其他卫星相

比不是非常明显，本部分专门对弱扩频信号的捕获进行了一些思考与尝试。

5.1 弱信号的影响因素

在实际应用系统中，卫星播发的扩频信号从发送到被地面导航仪接收，这中间会受到很多因素的影响。[6]

5.1.1 多径效应

在卫星导航系统中，电磁波在传输过程中受到折射和反射效应的影响，即多径效应。地面导航仪接受来自不同卫星的信号，这些信号具有不同的幅值衰减和相位，将引起接收信号的衰落，这种衰落对卫星扩频信号的捕获影响较大。

5.1.2 噪声干扰

地面导航仪接收到的卫星信号包含了一定的干扰和噪声，这些噪声会使得信号捕获的性能降低，导致无法检测出某些功率较弱的信号。本次大作业中，干扰的噪声当做高斯白噪声来处理。

5.2 算法描述

本文中针对弱信号的累计相关捕获算法，实际上是之前基于 FFT 的相关捕获算法的加强。对于弱信号，一次相关的峰值可能较小，而且受到噪声的影响较大，解决这一问题采用相关函数累加的方法。

为了减少噪声的影响，将长度为 20,000,000 的数据转为 10000×2000 的矩阵，矩阵每一列对应于长度为 2046 的 PRN 序列。通过更充分地利用这些数据，以此减小噪声对判断的影响。本此大作业对弱信号的应对方法是：间隔选取这 2000 个周期的若干个，使用与之前相同的预处理方法，分别与某个卫星的 PRN 序列做相关，所有的相关值累加起来，将最终累加的结果作为判断的标志。

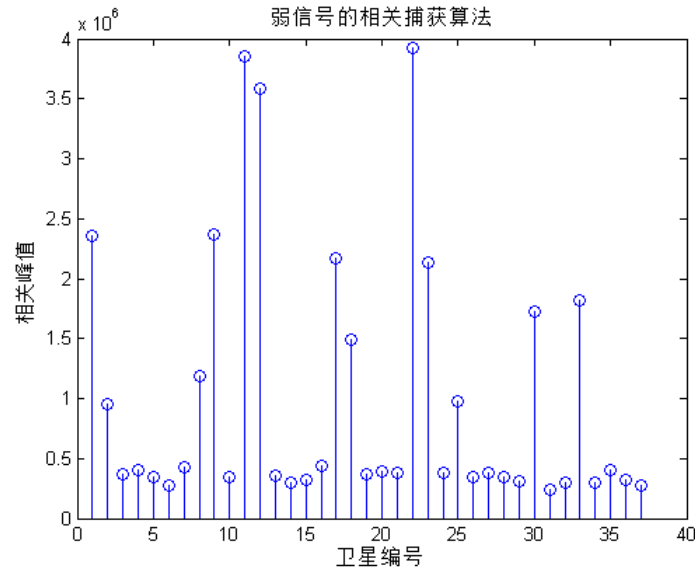


图 9: 弱信号的累计相关捕获算法

5.3 算法实现与分析

图8展示了针对弱信号的算法实现，可以看出卫星 2 和 25 的相关值与其他不存在的卫星信号的相关值之比有所提高，这对于之前设计的选择判决门限的方法来说，表明判断的精确度也有一定的提高。但是与此同时，算法的计算量也明显增加，导致程序运行的时间显著延长，因而在实际应用中，需要在准确度和计算效率之间进行选择。

6 结论

本次大作业通过计算卫星的 PRN 序列与接收信号之间的互相关，设计并实现了与 FFT 的时域相关捕获算法。同时，对算法进行了详细的分析与优化，对若干问题提出了较为完善的解决方法。经过测试数据的验证，该算法能够准确而快速地实现卫星扩频信号捕获；对于提供的数据，也能够明显区分哪些信号包含在接收信号中。同时本文还采用累计相关的思想设计了一种针对弱信号的捕获算法，捕获准确率略有提高，但是计算复杂度也有

所增加。总结来说，这次大作业通过数字信号处理的知识解决了实际问题，并设计和优化算法的过程中对相关知识进行了更深入地了解，有很大的收获。

7 附录

7.1 时域（离散）相关定理及证明

设 $y[n]$ 和 $c[n]$ 是两个长度均为 N 的序列，两个序列的相关函数为 $r[n]$ ，则

$$r[n] = \sum_{m=0}^{N-1} y[m]c[m-n]$$

对 $r[n]$ 作 DFT 变换有，

$$\begin{aligned} R[k] &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} y[m]c[m-n]e^{-j2\pi kn/N} \\ &= \sum_{m=0}^{N-1} y[m] \left[\sum_{n=0}^{N-1} c[m-n]e^{-j2\pi k(n-m)/N} \right] e^{-j2\pi km/N} \\ &= \sum_{m=0}^{N-1} y[m]e^{-j2\pi km/N} C^*[k] \\ &= Y[k]C^*[k] \end{aligned}$$

7.2 基于 FFT 的相关捕获算法—算法描述

Algorithm 1 时域相关捕获算法

输入: 导航仪接收的总信号的采样频率 f_s 及采样结果 $r[n]$; 卫星总数 $SateNum$; 各卫星的 PRN 序列 (本地码)。

输出: 接收信号中包含的卫星信号及对应的传播延迟。

1. 对接收信号的采样结果进行预处理, 与本地码相对应, 方便之后的相关运算, 预处理的结果记为 $y_p[n]$
2. 对 $y_p[n]$ 进行快速傅里叶变换, 将输入转换到频域, 记作 $Y[k]$, 取 $Y[k]$ 的复共轭为 $Y[k]_*$
 - for** $i = 1 : SateNum$
 - (a) 计算第 i 颗卫星的本地码 (PRN 序列) 的 FFT, 得到 $C[k]$
 - (b) 将 $Y[k]_*$ 与 $C[k]$ 点对点相乘, 结果为 $R[k]$
 - (c) 对 $R[k]$ 进行 IFFT(快速傅里叶变换的逆变换), 得到时域的相关函数 $r_{yc}[n]$
 - (d) 若 $r_{yc}[n]$ 的最大值超过设定的阈值, 则表明该卫星扩频信号与接收到的总信号相关性很强, 认为接收信号包含了该卫星播发的信号, 记录卫星序号 i 及 $r_{yc}[n]$ 取最大值时的 n 值。
 - end**
3. 所有卫星均处理完毕之后, 输出记录下的卫星信号及对应的延时。

end

7.3 代码清单

文件名	功能及说明
BD_Code.mat	北斗系统 37 颗卫星的 PRN 序列
Test_Data_int16.dat	测试数据文件 (已知含前 5 颗卫星)
UEQ_rawFile_int16.dat	实验数据文件 (包含卫星未知)

表 3: 数据文件

文件名	功能及说明
FFT_Acquisition_ver1.m	捕获算法初步实现
FFT_Acquisition_ver2.m	捕获算法优化后
FFT_Acquisition_weaksignal.m	针对弱信号的捕获算法
MyAlgorithm.m	最后的算法文件实现 (函数形式)
SampleMatchCode.m	辅助函数文件 (处理接收信号)
SetThreshold.m	辅助函数文件 (设置判决门限)
help1.m	以 1 号卫星为例, 与所有卫星做相关
help2.m	每个卫星 PRN 序列与接收信号相关

表 4: 算法实现的相关文件

参考文献

- [1] 蔡秀雄. GPS 扩频码的捕获与跟踪技术研究 [D]. 北京化工大学, 2009.
- [2] 康嵩山. GPS 信号捕获算法仿真及实现 [D]. 西华大学, 2010.
- [3] 郑君里, 杨为理, 应启珩. 信号与系统 (上)[J]. 2011.
- [4] Ward P W, Betz J W, Hegarty C J. Satellite signal acquisition, tracking, and data demodulation[J]. Understanding GPS principles and applications, 2006, 5: 174-175.
- [5] ElliottD.Kaplan, ChristopherJ.Hegarty, 卡普兰, 等. GPS 原理与应用 [M]. 电子工业出版社, 2012.
- [6] 刘远. 北斗二号导航弱信号捕获算法研究 [D]. 重庆大学, 2014.