

# Discussion and Analysis of Optimum Frame Synchronization Simulation Method for Data Receiving in Deep Space Mission\*

Chen Li<sup>1#</sup>, Benxia Zhu<sup>2</sup>, Yan Su<sup>1</sup>, Chunlai Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing

<sup>2</sup>Credit Reference Centre, People's Bank of China, Beijing

Email: <sup>#</sup>lichen@bao.ac.cn

Received: Nov. 30<sup>th</sup>, 2012; revised: Dec. 26<sup>th</sup>, 2012; accepted: Jan. 8<sup>th</sup>, 2013

**Abstract:** The realized channel coding performance is based on frame synchronization in the process of data receiving in deep space mission. Seeking the optimum frame synchronization performance is critical to improve the efficiency of data receiving. According to the frame synchronization strategy in national lunar mission, frame synchronization simulation software was completed and verified. This software simulation platform was used to find optimal parameter setting method for frame synchronization strategy in the case of high error bits rate. Simulation method was discussed to explore optimal parameters setting for frame synchronization by use of the software simulation platform. Some standards were established to measure the frame synchronization performance, and according to the results of frame synchronization simulation, evaluate the frame synchronization performance in conditions of different parameters setting. In the end, the article summed up a set of methods for seeking optimum frame synchronization parameter setting by use of this software, and by this way the frame synchronization simulation test data was generated. The report of optimum frame synchronization was completed on how to set the frame synchronization parameters after completely data analysis. The software's correctness was tested by equipment in national lunar exploration mission, and the optimum frame synchronization report can be consulted in data receiving system of deep space mission in future.

**Keywords:** Optimum Frame Synchronization; Simulation Research; Result Analysis; Deep Space Mission

## 深空任务数据接收最佳帧同步仿真与结果分析\*

李 臣<sup>1#</sup>, 朱本霞<sup>2</sup>, 苏 彦<sup>1</sup>, 李春来<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家天文台, 北京

<sup>2</sup>中国人民银行征信中心, 北京

Email: <sup>#</sup>lichen@bao.ac.cn

收稿日期: 2012 年 11 月 30 日; 修回日期: 2012 年 12 月 26 日; 录用日期: 2013 年 1 月 8 日

**摘 要:** 深空任务数据接收过程中, 帧同步是实现各种信道编码性能的基础, 寻求最佳帧同步是提高数据接收效率的关键环节。根据月球探测任务数据接收的帧同步策略, 完成了帧同步建模与仿真软件编写, 并进行了正确性验证。通过软件仿真来寻求在高误码率情况下帧同步策略的最佳参数设置方法。通过使用经过验证的软件仿真平台, 探讨最佳帧同步参数设置的仿真方法。制定帧同步的性能衡量标准, 并根据帧同步仿真结果评价不同参数设置下的帧同步性能。最后, 总结出一套寻求最佳帧同步参数设置的方法, 根据该方法得到了仿真测试数据, 通过对仿真数据的分析, 得到了最佳帧同步的组合参数报告。经过工程任务设备的正确性检验, 最佳帧同步组合参数仿真报告可以作为深空任务数据接收中帧同步的参数设置提供参考。

\*基金项目: 国家天文台青年基金(0835032002)资助。

<sup>#</sup>通讯作者。

**关键词：**最佳帧同步；仿真研究；结果分析；深空任务

## 1. 引言

我国近地卫星的无线电数据传输过程中，数据传输信号信噪比高，误码率低，帧同步采用的固定门限的三态逻辑技术，实现简单，可靠性高，帧同步三态逻辑的可用参数设置范围比较大。但在未来的深空任务数据接收任务中，信号微弱，误码率高。在这种情况下，帧同步方法和参数设置是实现高效解码和提取数据必须考虑的问题。

国外进行过多次深空探测任务，在相关领域的研究具有针对性，根据不同探测任务的特点，研究了对应的帧同步策略。国内的研究主要针对在近地空间数据系统帧同步的建模与仿真，在深空任务帧同步领域缺少通信特性研究和帧同步效果的评判方法。

作者根据三态逻辑的工作机理，完成了基于虚拟无线电仿真软件<sup>[1]</sup>的编写，该仿真平台主要研究在不同条件下，数据接收帧同步的最佳参数设置问题。需要讨论的问题是通过采用合适的方法和评断标准，确定不同条件下的最佳帧同步参数值。达到的目标是在数据接收机完成数据解调后，根据位流的误码情况选择最佳的三态逻辑帧同步参数设置，提高接收位流数据的帧同步效率，这样给数据接收带来两个好处：

- 1) 保持位流数据帧同步的可靠性，降低数据丢失率，提高有效数据获取完整性；
- 2) 落地数据帧同步保持稳定可靠，为深空任务信道编解码(RS 编码、级联编码等)提供了保障，保证译码操作稳定可靠进行，以达到稳定地获取信道编码增益的目的。

下面针对基于三态逻辑的帧同步方法进行帧同步仿真与结果分析，探讨在高误码率条件下的最佳帧同步锁定参数组的确定问题。

## 2. 三态逻辑帧同步参数定义

### 2.1. 三态逻辑原理模型

帧同步指把接收端的帧状态调整到与发送端帧状态具有正确的关系，并保持这种正确关系的过程，实现这个过程依靠三态逻辑模型<sup>[2-4]</sup>，其原理如图 1 所示。

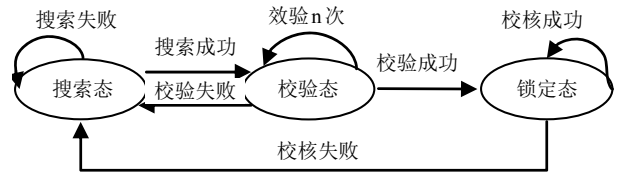


Figure 1. Theory model of three states  
图 1. 三态逻辑原理模型

#### 1) 搜索态

对接收码流逐比特进行同步检测，码元与设定的帧同步码组的相关值达到预设门限(容错码元数  $S$ )，就进入校验态。若校验失败，返回搜索态，校验成功，进入同步态。

#### 2) 校验态

进入校验态后，为了防止虚假同步，找到第 1 组同步码后跳过 1 帧长度进行同步码检测(容错码元数  $X$ )，若连续经过  $M$  帧同步检测结果均达到预设门限，确认同步正确，则立即转入同步态，否则，返回搜索态。

#### 3) 同步态

处于同步状态时，只有连续丢失  $N$  帧同步码(连续  $N$  个帧头同步检测均不满足门限(检测门限  $T$ )要求)，返回搜索态，否则，保持同步态。

上述帧同步码锁定过程是经典算法，本仿真程序设计上的算法流程参见图 2。

由上述三态逻辑的运行规则，我们可以通过设置不同的容错位数、校验帧数、失步帧数等参数，来调整帧同步策略，保证了帧同步具有调整空间，以适应在不同误码率的条件下进行帧同步策略调节，使帧同步性能最优。

### 2.2. 帧同步仿真参数配置

对以上述帧同步码锁定过程进行仿真分析，通过设置不同的参数寻求最佳的帧同步锁定方案。仿真所需设置的参数配置定义如下：

- 1) 误码率，用  $P_e$  表示；
- 2) 帧码组类型，用  $Frame\_Type$  表示，其中帧同步码组长用  $F\_length$  表示，数据长用  $D\_length$  表示；
- 3) 搜索容错位数，用  $S\_bit$  表示；
- 4) 校验容错位数，用  $X\_bit$  表示，校验数量，用

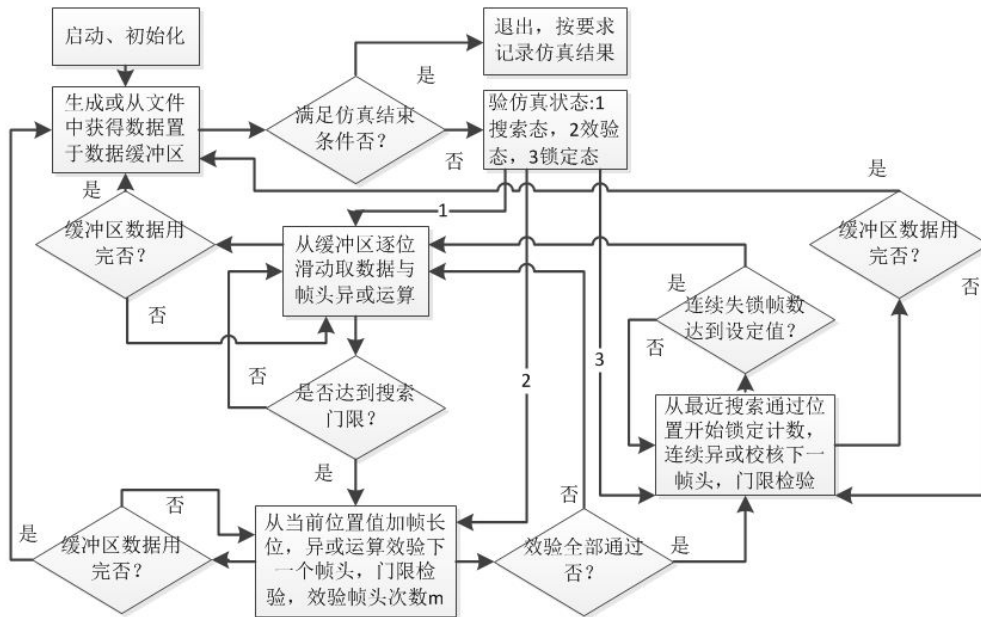


Figure 2. Theory model of three states  
图 2. 三态逻辑原理模型

X\_num 表示;

5) 锁定容错位数, 用 T\_bit 表示, 校核数量, 用 T5\_num 表示;

6) 在仿真中为了简明地表示参数设置数值, 特定定义“S\_bit:X\_bit:T\_bit:X\_num:T\_num”为统一的参数数组。例如: 搜索容错 2 位, 校验容错 2 位, 校核容错 3 位, 校验帧数为 3 帧, 校核帧数为 3 帧, 应设置的参数为 2:2:3:3:3。

帧同步最佳锁定的特点要求帧同步码的识别概率要尽可能大, 平均入锁时间短, 抗假锁能力强, 同步稳定, 失锁概率小。根据这些要求设置评价锁定效果的参数如下:

- 1) 搜索次数: S\_num, 搜索位数: S\_time;
- 2) 校验次数: C\_num, 校验帧数: C\_time;
- 3) 入锁次数: L\_num, 锁定帧数: L\_time;
- 4) 错锁次数: E\_num, 错锁帧数: E\_time;
- 5) 接收数据: D\_valid, 数据总量: D\_all;
- 6) 总计算量: T\_total。

数据传输效率要求: 接收到的有效数据比率越高越好; 在尽量少的计算量下, 接收到尽量多的有效数据, 接收到的有效数据中信息数据比率越高越好。根据这要求设置数据传输效率评价参数:

- 1) 数据获取比例:  $D\_valid/D\_all$ ;

- 2) 数据接收效率:  $D\_valid/T\_total$ ;

- 3) 有效数据比例:

$$Rate = D\_length / (F\_length + D\_length)。$$

上面前两个参数衡量了数据接收的理想程度, 第三个参数由帧同步码及帧长度决定。

### 3. 仿真平台设计简介

#### 3.1. 软件编制简介

本仿真平台是在 Window 7 操作系统下, 使用 Visual C++ 集成开发软件编制而成。采用了基于对话框的人机交互界面, 使用 C++ 和 C 语言混合的编程模式, 实现了经典帧同步算法的模块化仿真, 主要的结构框图参见图 2。该软件平台界面友好而性能稳定, 完成了大量高强度的仿真工作, 外观见图 3。

界面左侧为数据文件生成与误码率验证模块, 右侧为基于数据文件的帧同步仿真模块、基于仿真终止条件的的循环仿真模块和基于文件的参数遍历仿真批处理模块, 仿真参数可设, 仿真结果可见, 结果保存可选。

#### 3.2. 仿真功能设置

仿真平台具备模拟实际情况能力和仿真结果的



Figure 3. Interface of simulation form for frame synchronization  
图 3. 帧同步仿真平台界面

验证能力,基本功能有:随机数据生成功能<sup>[5,6]</sup>,数据文件生成功能,误码率测试功能,帧同步仿真及其结果统计功能。各功能模块基本设计如下:

- 1) 随机数据生成功能:随机数据周期足够长,随机特性满足随机特性要求;
- 2) 数据文件生成功能:误码率、帧头、帧长可设,帧计数和时码数据可选,生成数据长度可设,采用二进制格式存储与运算;
- 3) 误码率测试功能:帧数据误码率测试功能,格式符合指定要求;
- 4) 帧同步仿真及结果统计功能:具有实时数据循环帧同步仿真功能、基于数据文件的帧同步仿真功能和基于文件的参数遍历仿真功能。实时数据帧同步仿真循环生成二进制测试数据(误码率、帧头、帧长可选,生成数据长度可设),同时进行帧同步处理与结果统计;基于数据文件的帧同步仿真的数据来源是文件,仿真中完成帧同步处理与结果统计;基于文件参数遍历仿真是主要使用的方法,它首先根据 5 个帧同步输入参数的变化范围,对参数数组所有组合方式统计,对于每一种参数组合,进行基于文件的帧同步仿真,记录仿真结果。

参数组合的遍历算法是采用 C 语言的 5 重循环语

句来实现的,通过设定 5 个输入变量的取值范围,实现各参数在该范围的遍历组合运算。

### 3.3. 关键参数

- 1) 帧同步码组。根据空间数据系统咨询委员会(CCSDS)对高级在轨系统(AOS)的提出的一系列建议书,设定下行数据传输的帧同步码分别设置为:EB90、FAF320、1ACFFC1D,拟对这三组帧同步码头的数据进行帧同步仿真。
- 2) 误码率。航天任务特别是深空任务中,信号弱,误码率高,帧同步难度大,这里主要针对高误码情况下的帧同步仿真,误码率分别设置为 5E-1、3E-1、1E-1、7E-2、5E-2、3E-2、1E-2 等 7 档。
- 3) 时码和帧计数。该数据内容为可选项,仿真时不加误码。

## 4. 最佳帧同步仿真方案

### 4.1. 帧同步性能一致性测试

在误码率量级和帧同步码组相同的条件下,讨论仿真结果的一致性,确定帧同步最优性能参数组合的方法。根据仿真一致性好的条件确定生成的固定文件的生成。

主要使用实时数据循环仿真方法来测试同一条件下的数据接收性能的一致性。

#### 4.2. 分类与组合参数择优

在不同条件下找出对应的最佳帧同步参数设置策略，需要区分不同条件进行仿真试验，根据结果进行择优判断。不同条件包括误码率、帧同步码类型等，组合设置见表 1。

从表中可以看出，需要进行的帧同步仿真组合共有 21 种，仿真时对每一种组合选出同步性能效果最优的参数组合(参数组合范围经分析选取)，把结果记录下来。由于参数设置组合数繁多，采用基于文件的参数遍历仿真功能进行数据接收性能测试。

#### 4.3. 高综合性能参数组合

对于一组参数设置在多种误码率条件下帧同步仿真结果的综合性能探讨，挑选出具有综合性能优良的参数组合。

#### 4.4. 帧长度的影响分析

考虑不同帧长度对帧同步结果的影响。帧同步码类型和帧数据长度决定了有效数据比率，根据不同帧同步码和数据长度的仿真结果，讨论帧长度对数据接收性能的影响。这是测试有效数据比例参数对结果的影响。

#### 4.5. 帧同步参数设置分析

根据误码率和帧同步码组来确定帧同步三态逻辑的参数取值范围。原则是误码率越高容错数值相应提高，帧同步码长度越大，容错数值相应提高。

最大容错数与帧同步码组的长度之比不大于误码率。校验和校核的帧数大于 0。如果考虑工作量因素，适当缩小组合的取值范围。在计算允许的情况下可以考虑采用全范围内参数遍历设置仿真。

Table 1. Classification of simulation conditions for frame synchronization

表 1. 帧同步仿真条件分类

	5E-1	3E-1	1E-1	7E-2	5E-2	3E-2	1E-2
EB90	1	2	3	4	5	6	7
FAF320	8	9	10	11	12	13	14
1ACFFC1D	15	16	17	18	19	20	21

### 5. 最佳帧同步结果分析

#### 5.1. 一致性测试结果分析

##### 5.1.1. 文件长度与数据接收参数的关系

测试循环次数与数据接收率和接收效率的关系，画出它们的关系曲线，选择合适的实时数据循环仿真中的循环次数设置。

误码率选择 1E-1，参数设置为：3:3:3:3:3，循环次数(间接表示接收数据的总量)从 20 到 7000 范围内变化。图 4 是数据接收率与实时循环仿真时循环次数的关系图。

从图中可以看出，数据接收率具有恒定的特性，虽然仿真的数据随出现完全的更新变动，只要误码率和帧同步参数设置不变，数据接收率只会小幅度的随机变动，在循环次数小时，变化稍大，当循环次数较大，变化小。可以推论，数据接收率与循环次数的大小没有关系。循环次数达到 2000 次时，数据接收率数值比较稳定。

##### 5.1.2. 仿真结果一致性测试

当误码率处于高、中、低(5E-1、7E-2、1E-2)时，数据接收率分别为高、中、低状态下，测试接收数据指标的稳定性。重复测试次数取 10，循环次数选择 2000 次。

1) 帧同步码为 1ACFFC1D

选择的帧同步参数分别为 4:8:8:1:3、5:6:7:3:4、4:4:4:4:2。表 2 为仿真结果。

表 2 显示三种参数组合下，仿真所得数据接收率的均方差最大为 0.00387。

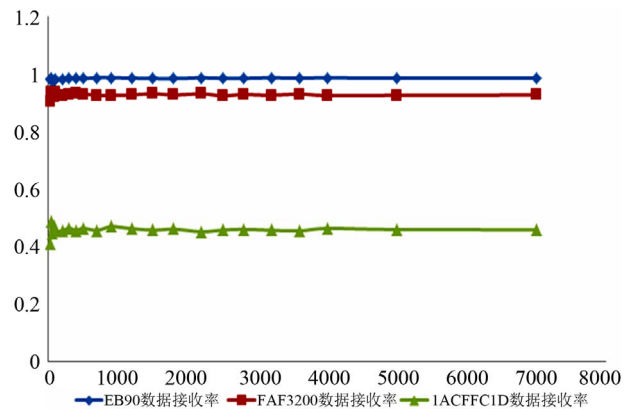


Figure 4. Relation between "Rate" and circulating number  
图 4. 数据接收率与循环次数关系图

选择的帧同步参数分别为 3:6:6:1:4、5:4:5:3:6、3:3:3:4:2。下表 3 为仿真结果。

表 3 显示三种参数组合下，仿真所得数据接收率的均方差最大为 0.003963。

3) 帧同步码为 EB90

选择的帧同步参数分别为 3:4:4:1:7、3:4:2:1:5、2:4:3:1:3。下表 4 为仿真结果。

表 4 显示三种参数组合下，仿真所得数据接收率的均方差最大为 0.001723。

总之，在三种帧同步码组下，仿真平台所得到的仿真结果一致，数据接收效率的均方差小，说明对于同样的帧同步码组和误码率级别情况下，仿真结果一致性好，为下面寻找最佳帧同步参数打下基础。

Table 2. Simulation results for error code that is equate 0.1  
表 2. 误码率 1E-1 的仿真结果

参数序号	数据接收率		
	4:8:8:1:3	5:6:7:3:4	4:4:4:4:2
1	0.9993	0.99934	0.659525
2	0.99942	0.99925	0.66388
3	0.999415	0.998995	0.665455
4	0.99933	0.99915	0.665762
5	0.99922	0.999055	0.65572
6	0.99926	0.998755	0.666795
7	0.99935	0.998965	0.66287
8	0.999405	0.999215	0.661478
9	0.99929	0.999155	0.657737
10	0.999445	0.999225	0.666552
均方差	7.62E-05	0.000171	0.00387

Table 3. Simulation results for error code that is equate 0.1  
表 3. 误码率 1E-1 的仿真结果

参数序号	数据接收率		
	3:6:6:1:4	5:4:5:3:6	3:3:3:4:2
1	0.56756	0.0929705	0.00064
2	0.56674	0.095855	0.00051
3	0.56157	0.09912	0.000835
4	0.571265	0.093135	0.00048
5	0.56071	0.09359	0.00088
6	0.56668	0.09617	0.000715
7	0.5598	0.093445	0.000835
8	0.56365	0.0974605	0.00066
9	0.56086	0.10273	0.0008
10	0.568755	0.096681	0.00079
均方差	0.003963	0.003114	0.000139

Table 4. Simulation results for error code that is equate 0.5  
表 4. 误码率 5E-1 的仿真结果

参数序号	数据接收率		
	3:4:4:1:7	3:4:2:1:5	2:4:3:1:3
1	0.0250401	0.01023	0.01107
2	0.025065	0.01138	0.010655
3	0.0265	0.010885	0.00986
4	0.02715	0.0102001	0.01062
5	0.02671	0.0112851	0.010565
6	0.026765	0.0107001	0.0105751
7	0.023955	0.010695	0.01017
8	0.02564	0.01099	0.00978
9	0.023345	0.0111351	0.010325
10	0.024905	0.0116601	0.010115
均方差	0.001273	0.000476	0.000398

5.2. 遍历参数组合仿真结果优选

5.2.1. 仿真测试方法

对表 1 中列出的 21 种组合进行遍历参数组合仿真，根据高误码率的条件，提出参数组合的遍历范围规定如下：

$$\begin{aligned}
 & \text{EB90: } 2 \leq S\_bit \parallel X\_bit \parallel T\_bit \leq 4, \\
 & 1 \leq X\_num \leq 4, 2 \leq T\_num \leq 8; \\
 & \text{FAF3200: } 3 \leq S\_bit \parallel X\_bit \parallel T\_bit \leq 6, \\
 & 1 \leq X\_num \leq 4, 2 \leq T\_num \leq 8; \\
 & \text{1ACFFC1D4: } \leq S\_bit \parallel X\_bit \parallel T\_bit \leq 8, \\
 & 1 \leq X\_num \leq 4, 2 \leq T\_num \leq 8.
 \end{aligned}$$

得到 21 组仿真测试数据结果，根据参数遍历范围可以得到每一组测试结果包含的数数据量按帧同步码分别为 EB90 共 756 个，FAF3200 共 1792 个，1ACFFC1D4 共 3500 个。

5.2.2. 仿真测试结果分析

由于仿真结果数量多，这里不列出。根据结果在 5E-1 和 1E-2 误码率条件下，各参数组合仿真结果出现两个极端：前者太差(错锁帧数与锁定帧数相当，都比较少)，后者太好(数据接收率全部为 100%)，不能区分参数组合的性能优劣。

在同一帧同步码条件下，根据其它五组误码率(3E-1, 1E-1, 7E-2, 5E-2, 3E-2)下的仿真结果进行筛选。随着误码率降低，帧同步仿真结果更加理想。把各组测试结果按照数据接收率进行降序排列，便可以数据接收性能优良的参数组合由高到低排序。按照下述



条件得到五组参数组合：

- 1) 3E-1 接收效率 80%以上参数组合；
- 2) 1E-1 接收效率为 100%参数组合；
- 3) 7E-2 接收效率低于 98%的参数组合；
- 4) 5E-2 接收效率低于 99%的参数组合；
- 5) 3E-2 接收效率低于 100%的参数组合。

帧同步仿真参数组合优选的条件是满足上述 1 和 2 条，但不满足 3、4 和 5 条的参数组合。

在三种帧同步码下，得到三组以数据接收率为优选条件的参数组合，分析所得参数组合优选前 10 组结果参见表 5。

### 5.3. 综合性能参数组合优选

从上述不同帧同步码的优选参数组合中寻求共同的组合，经求解没有满足要求的参数组合。说明对于不同的帧同步码，最佳帧同步参数组合是不相同的，如果有综合性能好的参数组合，各种误码条件下它不是最佳组合。

### 5.4. 帧长度对测试结果影响

针对不同帧同步码组，测试不同的帧数据长度对帧同步结果的影响，参数组合：3:3:3:2:2，保证错锁数为 0，选用误码率 1E-1，结果如下：

从帧码组为 EB90 的仿真结果图 5 可知，数据接收率比较稳定，数据接收效率波动在帧长小时较小，随着帧长增长迅速增加并稳定下来。

从帧码组为 FAF3200 的仿真结果图 6 可知，数据接收率比较稳定，数据接收效率波动在帧长小时较

小，随着帧长增长快速增加并稳定下来，相对于 EB90，其变化幅度更小。

从帧码组为 1ACFFC1D 的仿真结果图 7 可知，数据接收率比较稳定，数据接收效率波动在帧长小时稍大，随着帧长增长减小并很快稳定下来，相对于同步码 EB90 和 FAF3200，其变化幅度更小。总趋势是一条上下浮动很小(0.5 左右)的一条线。

总之，帧数据长度对帧同步时的数据接收率基本没有影响，当数据内容较短时(250 bits 以下)对数据接收效率的影响小，影响的程度与同步码长短有关，越长影响越小。

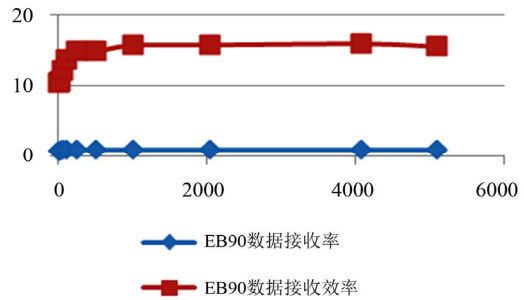


Figure 5. Relation between simulation results of EB90 and frame length  
图 5. EB90 数据接收与帧长关系图

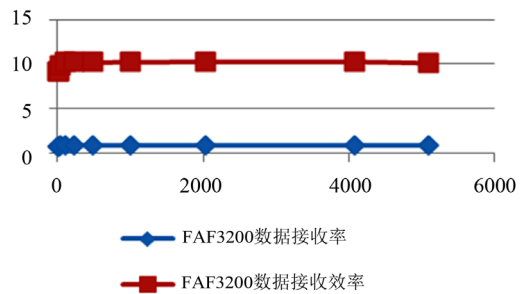


Figure 6. Relation between simulation results of FAF3200 and frame length  
图 6. FAF3200 数据接收与帧长关系图

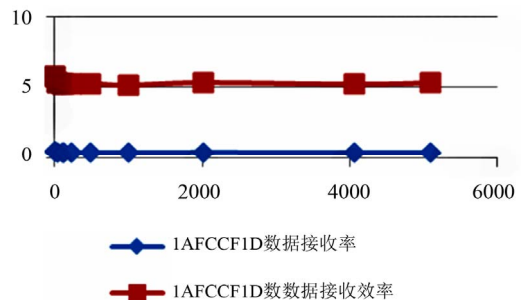


Figure 7. Relation between simulation results of 1ACFFC1D and frame length  
图 7. 1ACFFC1D 数据接收与帧长关系图

Table 5. Optimum results of parameter group for frame synchronization Simulation  
表 5. 帧同步仿真参数组合优选结果

排序	EB90 优选组合	FAF3200 优选组合	1ACFFC1D 优选组合
1	3:4:4:1:8	5:6:6:1:8	8:8:8:1:8
2	4:3:4:1:8	6:6:6:1:8	7:8:8:1:8
3	4:2:4:1:8	6:5:6:1:8	8:7:8:1:8
4	2:4:4:1:8	4:6:6:1:8	8:6:8:1:8
5	4:4:4:1:8	6:4:6:1:8	6:8:8:1:8
6	3:3:4:1:8	5:5:6:1:8	7:7:8:1:8
7	4:4:4:2:8	6:3:6:1:8	8:5:8:1:8
8	2:3:4:1:8	5:4:6:1:8	5:8:8:1:8
9	3:2:4:1:8	6:6:6:2:8	7:6:8:1:8
10	3:4:4:2:8	3:6:6:1:8	6:7:8:1:8

## 6. 结束语

本文使用虚拟无线电技术搭建的帧同步模型仿真软件,进行深空通信的数据接收的仿真方法探讨与分析,从仿真结果可得到下述结论:

1) 仿真中,循环仿真的循环次数大于 2000,仿真结果真实性和可靠性更好;

2) 不同帧同步码的最佳帧同步参数设置是不相同的,对于同一种帧同步码,最佳帧同步码在不同误码率条件下是一致的,选择最佳帧同步参数组合的原则是:在尽可能高的误码率情况下,帧同步的性能尽可能的好;

3) 在仿真误码率和帧同步码不变的情况下,帧长度的增加对帧同步数据接收率影响不大,但对数据接收效率具有正面影响。

4) 在本仿真软件的假设条件下,不同帧同步码下的最佳帧同步参数组合参见表 5,如果误码率和帧同步码有所不同,可以参照文中仿真办法寻求最佳帧同步参数组合。

## 7. 致谢

感谢李春来老师对相关基金课题的指导与支持,

正是该课题的带动下,使我在论文创作方面取得了发展和进步;感谢苏彦研究员在具体工作上给予了诸多鼓励和帮助,使我在后续研究内容方面指明了方向;感谢朱本霞和所有关心我的同事,他们在程序设计和仿真过程中做了大量工作,功不可没。

## 参考文献 (References)

- [1] 马玉松,刘开华. 虚拟无线电技术[J]. 天津通信技术, 2000, 2: 5, 6, 33.
- [2] 胡莉,张力伟,周希元. 帧同步检测技术的研究进展[J]. 无线电工程, 2009, 39(2): 12-15.
- [3] 陈相宁. 连续同步码的误检概率分析[J]. 通信与广播电视, 1998, 1: 14-18.
- [4] M. Chiani, M. G. Martini. On sequential frame synchronization in AWGN channels. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(2): 339-348.
- [5] 肖化昆. 系统仿真中任意概率分布的伪随机数研究[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(1): 167-171.
- [6] 张广强. 均匀随机数发生器的研究和统计检验[D]. 大连理工大学, 2005.