

# 星地通信链路快速建立方法研究

刘海燕<sup>a,b</sup>, 潘成胜<sup>a,b</sup>

(大连大学 a. 通信网络与信息处理重点实验室; b. 信息工程学院, 辽宁 大连 116622)

**摘 要:** 针对星地链路的快速建立问题, 提出一种星地通信链路的快速建立方法, 设计建链数据帧格式, 并给出星地链路建立条件下伪随机序列长度设计的基本原则。对建链概率和建链时间进行数学建模, 仿真结果表明, 在建链时间和传输时间近似相等的情况下, 当信噪比为-20 dB 时该方法可获得接近 1 的建链概率。

**关键词:** 卫星通信; 数据帧格式; 建链数据帧; 建链时间; 建链概率

## Research on Fast Establishment Method of Communication Link Between Satellite and Ground

LIU Hai-yan<sup>a,b</sup>, PAN Cheng-sheng<sup>a,b</sup>

(a. Key Laboratory of Communications Network and Information Processing; b. College of Information Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China)

**【Abstract】** Aiming at the problem of quickly establishing links between satellite and ground, a new method of fast links establishment is proposed, link establishment data frame format is designed, and the basic principles of pseudo-random length is given. In this paper, the mathematical model of link establishment probability and link establishment time is built, and the link establishment modes are repetitiously simulated. Simulation results demonstrate that under the precondition of guaranteeing link establishment time analogous to transmission time, with the SNR of -20 dB, link establishment probability is close to 1.

**【Key words】** satellite communication; data frame format; link establishment data frame; link establishment time; link establishment probability

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.18.019

### 1 概述

卫星对地链路, 特别是同步卫星对地链路, 是卫星通信网络中的核心通信链路, 研究该链路通信的快速建立方法对卫星通信网络的高效运行非常重要。目前, 针对星间链路的研究主要有以下方面: 星间链路建立策略<sup>[1]</sup>, 星间链路天线等设备捕获跟踪技术<sup>[2]</sup>, 卫星通信系统路由策略<sup>[3]</sup>等。而针对星间链路或星地链路建立方法的研究较少。

采用直接发送数据的方式, 链路建立时间长, 链路建立概率低, 易丢失早期发送的数据。本文针对同步卫星对地链路开展研究, 借鉴无线传感器网络<sup>[4]</sup>、第三代短波通信<sup>[5-6]</sup>、星间光通信系统<sup>[7]</sup>等技术中的多种链路建立技术, 提出了一种卫星对地链路快速建立的方法, 在建链时间可以容忍的条件下, 获得最大可能的建链概率, 可以有效地避免数据丢失。

### 2 星地链路建立方法设计

节点 A 和 B 之间的单次建链过程如下: 节点 A 发送

请求建链信号, 节点 B 捕获后向节点 A 发送回复信号, 节点 A 捕获回复信号后给节点 B 发送确认信息并开始通信<sup>[8]</sup>。为了提高链路建立的成功概率, 当单次建链过程失败时, 可以紧接着进行下一次的请求建链过程, 重复该过程  $M$  次。这样做虽然平均建链时间会增加, 但可以提高链路建立成功概率, 将重复  $M$  次的过程称为多次链路建立过程。

#### 2.1 链路建立过程

根据链路建立过程的特点和需求, 可将各通信节点的状态分为 4 种: 扫描状态, 等待回复信号状态, 等待确认信号状态, 正常通信状态, 如图 1 所示。当节点设备刚启动、节点从中断中恢复或网络重构时, 节点首先进入扫描状态, 查询是否有来自于本节点管理层的建链命令, 检测是否有来自于其他节点的建链请求信号。如查询检测不到任何命令或信号, 节点保持在扫描状态; 如果收到来自于本节点的建链命令, 则发送请求建链信息, 进入等待回复

**基金项目:** 国家“863”计划基金资助项目(2011AAXX); 辽宁省科技厅创新团队基金资助项目(L2011217); 辽宁省教育厅科研基金资助项目(2009A066)

**作者简介:** 刘海燕(1963—), 女, 教授、博士、CCF 会员, 主研方向: 卫星通信网络; 潘成胜, 教授

**收稿日期:** 2011-11-17 **修回日期:** 2012-01-12 **E-mail:** liuhaiyan1@dlu.edu.cn

信号状态;如果检测到来自于其他节点的建链请求信号,则进入等待确认信号状态。

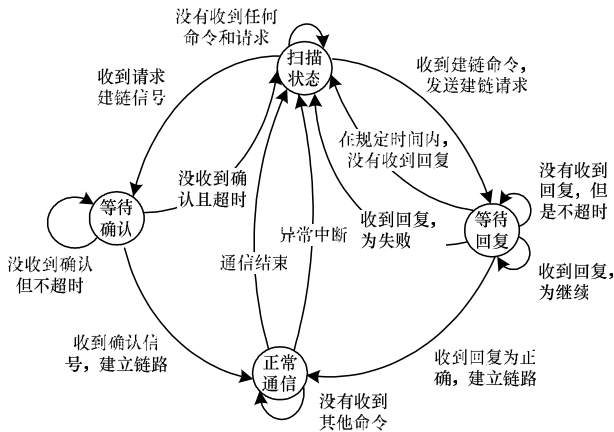


图1 星地链路建立过程状态转移图

## 2.2 链路建立协议设计

在卫星通信网络节点间的链路建立技术中,拟将协议分成3层,即管理层、数据链路层和物理层。管理层对用户进行身份认证,根据用户安全级和优先级的不同选择链路、传输模式等,根据数据链路层信息选择下一步操作。数据链路层发送请求建链、回复等信息,将伪随机码序列、帧类型码、状态等信息按照协议约定封装成帧,解析接收到的请求、回复等信息,解析用户的地址和状态信息。在物理层,发送端进行信道编码、数字调制、载波调制并发送;接收端接收装置和天线扫描、检测并捕获请求信号或回复信号,进行解调、解纠错,得到请求信号或回复信号。

## 2.3 基本帧结构设计

设计3种基本帧结构,即请求帧、回复帧和确认帧。

(1)请求帧的结构如图2所示。

伪随机码序列	帧类型码	下行链路信道监测序列	请求方状态	纠错码
--------	------	------------	-------	-----

图2 请求帧结构

伪随机码序列用于帧信号捕获,并完成伪码的初同步。伪随机码序列的随机模式、长度、捕获方式等,都会影响链路的建链概率和建链时间,因此,伪随机码序列的设计对系统的影响非常大。请求方状态携带请求方地址、目的地址、状态等信息。

(2)回复帧的结构如图3所示。

伪随机码序列	帧类型码	下行链路信道状态	上行链路信道监测序列	回复方状态	纠错码
--------	------	----------	------------	-------	-----

图3 回复帧结构

帧结构中“下行链路信道状态”用于存储地面信道估计的结果,上传给静止卫星,即请求方。

(3)确认帧的结构如图4所示。

伪随机码序列	帧类型码	上行链路信道状态	确认状态	纠错码
--------	------	----------	------	-----

图4 确认帧结构

帧结构中“上行链路信道状态”用于存储星上信道估

计的结果,下传给地面站,即回复方。“确认状态”用于存储链路建立模式。

## 3 星地链路建立过程的性能分析与设计

### 3.1 性能指标

衡量链路建立过程的性能,主要从其有效性、可靠性2个方面来进行<sup>[9]</sup>。

有效性体现在链路建立时间上,建链时间短则有效性高,建链时间长则有效性低。可靠性体现在链路建立概率上,建链概率高则可靠性高,建链概率低则可靠性差。影响有效性、可靠性的因素有多种,如发射设备及天线设备的工作方式和控制方式、建链模式的采用、建链数据帧的长度和格式等。

本文不涉及发射设备及天线设备的工作方式和控制方式所产生影响<sup>[2]</sup>,可以视其为常数。而建链数据帧的长度和格式对链路建立概率的影响很大。数据帧的长度越长,链路建立成功的概率越大,可靠性越高,同时建链时间越长。数据帧伪随机码序列的设计对接收是否解码成功起至关重要的作用。前向纠错技术、检错重发技术、交织技术和数字调制解调等技术的同时采用,使数据帧格式的复杂度增加,建链时间延长,但是系统的抗加性噪声能力和抗突发错误的能力增强了,系统的可靠性增加了。当设计某个参数时,在可靠性增加的同时,可能会使有效性降低<sup>[10]</sup>。因此,需要在保证基本工作需要、最低工作需求的前提下,针对各种性能寻找最优值、最佳区间或折中参数值。

### 3.2 单次请求链路建立模式

设下行载波信号频率为12 GHz,上行频率为14 GHz,双向数传速率为600 Mb/s,同步卫星到地面站长度为36 000 km。首先分析单次请求和多次请求时链路建立时间和链路建立概率的计算问题。

(1)链路建立时间 $T_{LE}$

单次请求的链路建立时间 $T_{LE}$ 由以下9项相加而成:星上请求帧发送时间 $T_{CALL}$ ,星地链路传输时间 $T_{ST1}$ ,地面天线捕获时间 $T_{AA1}$ ,地面伪随机序列捕获时间 $T_{ACD}$ ,地面回复帧发送时间 $T_{RSP}$ ,地星链路传输时间 $T_{ST2}$ ,星上天线捕获时间 $T_{AA2}$ ,星上伪随机序列捕获时间 $T_{ACS}$ 和星上确认帧发送时间 $T_{ACK}$ 。即:

$$T_{LE} = T_{CALL} + T_{ST1} + T_{AA1} + T_{ACD} + T_{RSP} + T_{ST2} + T_{AA2} + T_{ACS} + T_{ACK} \quad (1)$$

其中,星上请求帧发送时间 $T_{CALL}$ 、地面回复帧发送时间 $T_{RSP}$ 和星上确认帧发送时间 $T_{ACK}$ 3项均为序列码的发送时间,计算方法相同,均为序列总长度(bit)/(600 Mb/s),定义为:

$$T_{SQ} = T_{CALL} + T_{RSP} + T_{ACK} = \frac{N_{CALL} + N_{RSP} + N_{ACK}}{600 \times 10^6} \quad (2)$$

其中, $N_{CALL}$ 、 $N_{RSP}$ 、 $N_{ACK}$ 分别为请求帧、回复帧和确认帧序列的总长度。当请求帧、回复帧和确认帧设计完毕

后,  $T_{SQ}$  即可得出准确值。

由于星到地和地到星的传输距离相等, 因此可以认为星地链路传输时间  $T_{ST1}$  和地星链路传输时间  $T_{ST2}$  近似相等, 且均用  $T_{ST}$  表示。  $T_{ST}$  取决于星地传输距离的长度, 则星地链路传输时间  $T_{ST} = 36\ 000/300\ 000 = 0.14\text{ s}$ 。

同样认为地面天线捕获时间  $T_{AA1}$  和星上天线捕获时间  $T_{AA2}$  近似相等<sup>[2]</sup>, 且均用  $T_{AA}$  表示, 将作  $T_{AA}$  为常数处理, 记为  $\tau_A$ 。

由于选择相同长度和类型的伪随机码序列, 因此地面伪随机序列捕获时间  $T_{ACD}$  和星上伪随机序列捕获时间  $T_{ACS}$  近似相等, 且均用  $T_{AC}$  表示。

因此, 单次请求的链路建立时间  $T_{LE}$  简化为:

$$T_{LE} = 2T_{AC} + T_{SQ} + 2\tau_A + 0.28 \quad (3)$$

需优化设计伪随机码序列, 使链路建立时间  $T_{LE}$  满足系统的设计要求。

#### (2) 链路建立概率 $P_{LE}$

单次请求的链路建立概率  $P_{LE}$  是以下 4 项相乘: 地面天线捕获概率  $P_{AD}$ , 地面伪随机序列捕获概率  $P_{dD}$ , 星上天线捕获概率  $P_{AS}$  和星上伪随机序列捕获概率  $P_{dS}$ 。即:

$$P_{LE} = P_{AD} \times P_{dD} \times P_{AS} \times P_{dS} \quad (4)$$

同样认为地面天线捕获概率  $P_{AD}$  和星上天线捕获概率  $P_{AS}$  近似相等<sup>[2]</sup>, 由于天线捕获技术不在本文的研究范围之内, 因此将  $P_{AD} \cdot P_{AS}$  作为常数处理, 记为  $\mu_A$ 。

由于选择相同长度和类型的伪随机码序列, 因此地面伪随机序列捕获概率  $P_{dD}$  和星上伪随机序列捕获概率  $P_{dS}$  近似相等, 也称为检测概率, 记为  $P_d$ 。式(6)简化为:

$$P_{LE} = \mu_A \cdot P_d^2 \quad (5)$$

需优化设计伪随机码序列, 使链路建立概率  $P_{LE}$  满足设计要求。

### 3.3 多次请求链路建立模式

信道中的噪声等效于一个缓慢变化的随机过程和一个相对快速变化的随机过程相乘, 这个缓慢变化的随机过程即日夜的变化、天气的变化、季节的变化等自然因素影响的综合结果, 这个相对快速变化的随机过程即突发事件下信道产生的变化。

根据上文的分析, 信道特性是时变的, 但可以认为是短时平稳的。将时间分成以一次请求时间为一个时隙, 在一个时隙之内, 认为建链概率是常数。这样, 建链概率将是一串随机的离散值, 彼此独立, 相邻时间间隙的建链概率值会缓慢变化, 但不会突变。

设  $T_{LE}$  为单次请求的建链时间, 相应每个时隙内的建链概率为  $P_{LE1}, P_{LE2}, \dots$ , 则:

请求一次, 建链成功的概率为:

$$P = P_{LE1}$$

平均建链时间为:

$$T = P_{LE1} \cdot T_{LE}$$

请求二次, 建链成功的概率为:

$$P = P_{LE1} + (1 - P_{LE1}) \cdot P_{LE2}$$

平均建链时间为:

$$T = P_{LE1} \cdot T_{LE} + (1 - P_{LE1}) \cdot P_{LE2} \cdot 2 \cdot T_{LE}$$

.....

请求  $M$  次, 建链成功的概率为:

$$P = P_{LE1} + (1 - P_{LE1}) \cdot P_{LE2} + \dots + (1 - P_{LE1}) \cdot (1 - P_{LE2}) \cdot \dots \cdot (1 - P_{LE(M-1)}) \cdot P_{LEM}$$

平均建链时间为:

$$T = P_{LE1} \cdot T_{LE} + (1 - P_{LE1}) \cdot P_{LE2} \cdot 2T_{LE} + \dots + (1 - P_{LE1}) \cdot (1 - P_{LE2}) \cdot \dots \cdot (1 - P_{LE(M-1)}) \cdot P_{LEM} \cdot M \cdot T_{LE}$$

当  $T \rightarrow \infty$  时, 可以证明建链成功的概率为:

$$P = \lim_{M \rightarrow \infty} [P_{LE1} + (1 - P_{LE1}) \cdot P_{LE2} + \dots + (1 - P_{LE1}) \cdot (1 - P_{LE2}) \cdot \dots \cdot (1 - P_{LE(M-1)}) \cdot P_{LEM}]$$

平均建链时间为:

$$T = \lim_{M \rightarrow \infty} [P_{LE1} \cdot T_{LE} + (1 - P_{LE1}) \cdot P_{LE2} \cdot 2T_{LE} + \dots + (1 - P_{LE1}) \cdot (1 - P_{LE2}) \cdot \dots \cdot (1 - P_{LE(M-1)}) \cdot P_{LEM} \cdot M \cdot T_{LE}]$$

当  $P_{LE1} = P_{LE2} = P_{LE3} = \dots = P_{LE}$  时, 可以证明建链概率为  $P=1$ , 平均建链时间为  $T = T_{LE} / P_{LE}$ 。

### 3.4 伪随机序列长度的设计

伪随机序列长度的设计要求伪随机序列的平均捕获时间  $\bar{T}_{AC}$  不高于空地链路信号的传输时间  $T_{ST}$ 。此时伪随机序列的捕获时间可以和传输时间相比较, 捕获时间只占用部分链路建立时间, 不起主要作用, 继续缩短伪随机序列长度意义不大。

#### (1) 单次请求的链路建立时间 $T_{LE}$

随机序列长度  $N$  加上其他字段, 请求帧、回复帧和确认帧的总长度约为 48 000 bit, 因此, 序列传输时间  $T_{SQ}$  为:

$$T_{SQ} = 48\ 000 / 600\ \text{M} = 32 \times 10^{-6} \text{ s} = 0.032\ \text{ms}$$

整个系统单次请求的建链时间为:

$$T_{LE} = 2T_c + T_Q + 2\tau_A + 0.28 = 0.28 + 0.000\ 032 + 2\tau_A + 0.28 \approx 0.56 + 2\tau_A\ \text{s}$$

#### (2) 单次请求的链路建立概率 $P_{LE}$

当伪随机序列长度  $N$  取 15 000 bit, 并采用 16QAM 调制方式时, 捕获概率与信噪比关系仿真结果如图 5 所示。当信噪比很低时, 捕获概率受信噪比影响较大, 当信噪比较高时, 捕获概率接近于 1, 受信噪比影响很小。

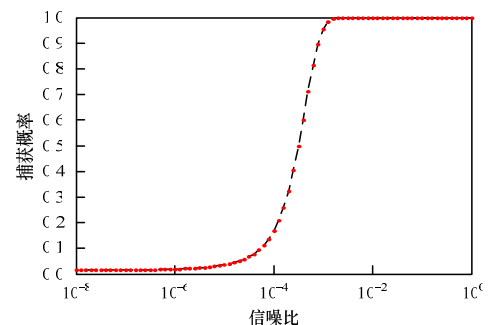


图 5 捕获概率与信噪比关系

可见,当天线等设备的性能非常好时,单次请求的链路建立时间和建立概率主要取决于伪随机序列的捕获时间、空地传输时间和伪随机序列的捕获概率;当天线等设备的性能很差时,单次请求的链路建立时间和建立概率主要取决于天线等设备的捕获时间和捕获概率。

#### 4 性能仿真

图6为平均建链概率 $P$ 和建链次数 $N$ 之间的关系,图7为平均建链时间 $T$ 和建链次数 $N$ 之间的关系, $T$ 的单位是 $T_{LE}$ 的倍数,为方便仿真,假设单次请求建链时间 $T_{LE}=1$ ,建链次数为1~20。当单次建链概率 $P_{LE1}, P_{LE2}, \dots$ 取0.9、0.88、0.92、0.87、0.89、0.93、0.91、0.95、0.85、0.89、0.88、0.92、0.93、0.91、0.9、0.9较高时,仿真结果如图中“—○—”线所示;当单次建链概率 $P_{LE1}, P_{LE2}, \dots$ 取0.5、0.48、0.52、0.51、0.53、0.56、0.54、0.5、0.52、0.54、0.51、0.57、0.53、0.55、0.5、0.5较低时,仿真结果如图中“—★—”线所示。

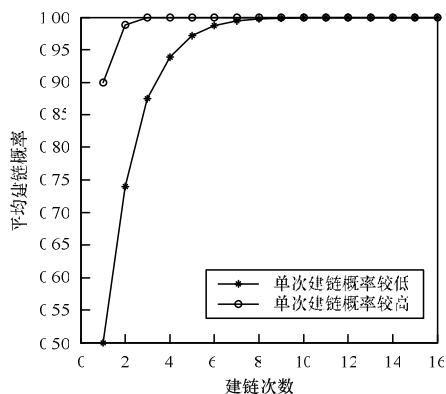


图6 平均建链概率与建链次数关系

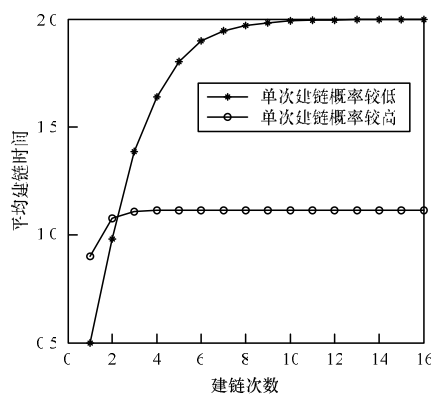


图7 平均建链时间与建链次数关系

由仿真结果可以清晰地看到,当单次建链概率较高时,只需较少的次数即可使平均建链概率 $P$ 达到接近1,而平均建链时间仅略高于 $T_{LE}$ ;当单次建链概率很低时,需较多次数才可使平均建链概率 $P$ 接近1,而平均建链时

间高于 $T_{LE}$ 近一倍。

可见,对每一次请求,伪随机码序列越长,建链概率越高,建链时间越长。对多次请求,请求的次数越多,建链概率越高,建链时间越长。理论上,请求无穷次时,建链概率为1,建链时间为无穷。

考虑到单次建链概率一般 $\geq 0.9$ ,一般取 $M=3$ 即可,即连续进行3次建链请求都失败,则系统返回初始状态,等待和执行上层发出的的其他命令。期间无论哪一次建链成功,系统都立即进入通信状态。

#### 5 结束语

本文设计了星地通信链路的快速建立方法和数据基本格式,提出了伪随机长度设计的基本原则,仿真结果表明,本文方法在保证建链时间不大于传输时间的情况下,即便是信噪比较差时(-20 dB)也可获得接近1的建链概率。本文方法以同步卫星对地链路作为研究和仿真条件,也可以应用于其他星地链路及星间链路的研究中。

#### 参考文献

- [1] 吴廷勇, 吴诗其. LEO/MEO 双层卫星网络层间星际链路建立策略的性能研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(1): 67-71.
- [2] 李德志. 二代中继卫星系统捕获跟踪技术与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [3] 潘艳辉, 王 韬, 李 华. LEO 卫星网络路由负载均衡方法研究[J]. 计算机工程, 2011, 37(18): 4-6.
- [4] 张志强, 张大方, 任小晶, 等. 一种基于 SMACS 的无线传感网快速连接算法[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(15): 2286-2289.
- [5] 姚广成, 钟晓峰, 朱正航, 等. 非对称恶劣信道下自动链路建立协议[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(1): 98-101.
- [6] 陈 鑫, 杜栓义, 江 莹, 等. 第三代短波自动链路建立协议特性研究[J]. 电子科技, 2007, 20(5): 56-60.
- [7] 于思源, 马 晶, 谭立英, 等. 提高卫星光通信扫描捕获概率的方法研究[J]. 光电子·激光, 2005, 16(1): 57-62.
- [8] Vidaller F, Briones M. Satellite Link Protocols Design for the CODE System[C]//Proc. of Olympus Utilization Conference. Paris, France: European Space Agency, 1989.
- [9] Horan S, Deivasigamani G. Design of A Fault-tolerant Satellite Cluster Link Establishment Protocol[C]//Proc. of IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA: [s. n.], 2005.
- [10] Cooley J A, Khazan R I, McVeety S. Secure Channel Establishment in Disadvantaged Networks: Optimizing TLS Using Intercepting Proxies[C]//Proc. of Military Communications Conference. San Jose, USA: [s. n.], 2010.

编辑 任吉慧