

一种新的 VHF 信道访问协议分析方法

张军,方新,潘磊,张其善

(北京航空航天大学电子工程系,北京 100083)

摘要: 本文提出了一种基于半马尔可夫模型的 VHF 信道访问协议分析方法. 在建立空地数据链信道访问的状态分析模型的基础上, 通过将状态平均停留时间和状态转移概率同时引入模型中, 给出了信道处于安全状态概率和系统忙用户数的表达, 为信道访问协议的性能分析和评价提供了一种新的方法. 这种方法不需限制系统参数分布为指数分布, 更接近实际情况, 将其用于 VHF 空地数据链系统的仿真结果表明, 该方法是行之有效的.

关键词: 甚高频数据链; 空地通信; CSMA; 半马尔可夫模型

中图分类号: TN961 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 03-0049-04

A New Method of Very High Frequency Channel Access Protocol Analysis

ZHANG Jun, FANG Xin, PAN Lei, ZHANG Qi-shan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A new method of VHF channel access protocol analysis based on semi-Markov model is presented in this paper. A model of channel access state transition for air-ground datalink is established. By introducing the state mean holding times (HT) and state transition probabilities (TP) into this model, the presentation of the safe state probability and the number of busy users is obtained, which is a new way for property analysis and evaluation of channel access protocol. By using this approach, system parameters are not restricted to an exponential distribution, which is close to the practical situation. The method has been applied into VHF datalink system and the simulation results show that it is effective.

Key words: VHF datalink; air-ground communication; CSMA; semi-markov model

1 引言

基于甚高频(VHF)信道的飞机与地面间的空地数据链系统在军民航新航行系统中获得了广泛应用. 空地数据链的异步传输特性使得 CSMA 成为一种有效的信道访问协议^[1].

传统的 CSMA 性能分析, 采用概率分析方法^[2,3], 此方法将用户数目假定为无穷多, 与实际情况不符. 文[4]中以传输时延为时基的时隙 CSMA 分析方法中, 将离散马尔可夫链作为工具进行分析, 便于进行计算机仿真, 但与空地数据链的用户有限、异步时间连续的 CSMA 方式有一定差异. 文献[5, 6]中又提出了对异步时间连续的 CSMA 信道协议访问方法的马尔可夫链模型, 在模型分析中, 对于报文长度、传输检测时间和碰撞时延等的分布均严格限制为负指数或爱尔兰分布, 这与空地数据链各参数的实际分布情况存在较大差异.

由于报文长度和信道传输检测时间的分布对系统的性能有着较大的影响, 迫切需要寻求一种放宽对系统各参数分布限制的信道访问协议分析方法, 才能深入了解和分析各参数不同分布给系统带来的影响. 针对上述情况, 本文提出了一种新的 VHF 信道访问协议分析方法——半马尔可夫模型分析法. 其优点在于: (1) 可以放宽系统参数分布的限制; (2) 可以

将状态平均停留时间和状态转移概率同时引入信道访问的状态分析模型中, 获得信道处于不同状态的概率和系统忙用户数的数学表达; (3) 可以用信道处于安全状态的概率作为信道有效利用率的评价指标, 为信道访问协议的性能分析和评价提供了一种新的方法.

将该模型应用于 VHF 空地数据链系统中, 揭示了系统不同参数分布下对空地数据链性能的影响. 计算机仿真结果表明, 这种方法具有很好的效果. 并且已经作为系统设计及参数优化的依据应用于我国 VHF 空地数据链的建设中.

2 空地数据链信道访问模型

2.1 基本假设

在 VHF 空地数据链系统中, 地面站覆盖范围内的飞机数称为用户数 M . 地面站与飞机间传送的数据报文在信息传输率一定的条件下, 报文长度可用发送时间 T 表示, 设其概率密度函数为 $f_T(t)$. 各飞机之间相互独立, 系统构成异步系统.

对于 VHF 信道, 所有飞机都检测到信道上已有数据包在传输的时间为 t_d , 其概率密度函数为 $f_{t_d}(t)$; 信道中碰撞发生后飞机检测到信道重新空闲的时间称为延迟时间 t_c . 采用 CSMA 协议的系统中, 飞机无法探测碰撞发生, 信道中碰撞发生后,

收稿日期: 1999-03-11; 修订日期: 1999-07-19

基金项目: 航空科学基金和航空预研基金资助课题

飞机仍坚持发完数据,因而 $t_c = T$. 对于数据链系统中,飞机收到新数据包待发或正在传送数据包,称此飞机为忙用户,系统的忙用户数目用 n 表示. 飞机无包发送或数据包已发送完(例如该飞机飞离地面站覆盖区),称此飞机为空闲用户.

设每个飞机产生新数据包的速度为 λ ,且以泊松流方式到达. 设飞机只有一个缓存,系统中 $(M - n)$ 个飞机用户产生新包的速率为 $NP(n) = (M - n) \lambda$ 个/秒,新包的到达时间间隔为 t_n ,它服从负指数分布,均值为 $1/(M - n) \lambda$. 对于 CSMA 协议,飞机在发送数据包之前,先监听信道,信道若空闲,则发送;否则,则延时一段时间后再试图发送,在延时的时间内,飞机并不监听信道. 设此延时的长度为 t_r ,服从负指数分布,其均值为 $1/R$,即每秒平均重试 R 次. R 称为监听密度,则系统中忙用户数据包的试图发送率为 nR .

2.2 系统状态模型分析

图 1 给出了空地数据链系统状态转移图.

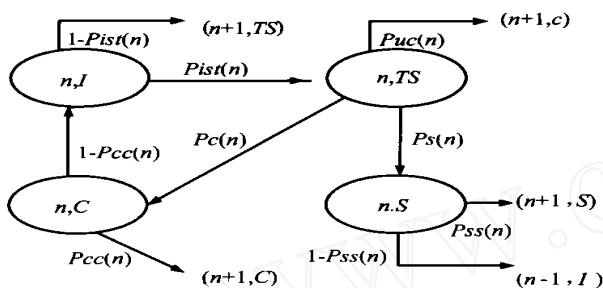


图 1 状态转移图

设某一特定时刻 t ,空地数据链所处的状态表示为 $DS_t = (n, U)$, n 表示系统的忙用户数目, $n \in \{0, 1, 2, \dots, M\}$, $U \in \{I, TS, S, C\}$,为信道状态.

参见文[5], I 表示信道处于空闲状态; TS 表示系统中某一飞机开始发送数据包,但并非所有飞机已检测到这一发送; S 表示所有飞机都已经得知有一飞机以在传递数据,该飞机的发送处于安全状态; C 表示多架飞机发送数据,信道中数据发生碰撞.

从模型的假设条件中,并未要求数据包的长度、传输检测时间及碰撞延时服从负指数分布或爱尔兰分布,这使得系统并不在每一时刻满足马尔可夫特性,但系统在系统状态发生转移的时刻,仍然满足马尔可夫特性. 系统在状态转移的时刻具有马尔可夫特性. 这样, $DS_t = (n, AS)$ 构成一个 $M + 1$ 层的嵌入式马尔可夫链^[7].

2.3 状态转移概率计算

在以下的计算中,设传输检测时间 t_d 在时间段 $[D/2, D]$ 内服从均匀分布, D 表示在 VHF 信号覆盖范围内飞机相互间数据发送的信号传输延时的最大值;数据包的长度用发送时间 T 表示,为定值.

以 (n, TS) 时为例,分析系统转移概率,以 (n, TS) 时为例. 系统处于 (n, TS) 状态时,有三种事件会触发系统状态跳转. (1)原 $(M - n)$ 空闲用户中有一个产生新数据包,监听信道后发现空闲,于是发送,引起信道内数据碰撞;(2)原 $(n - 1)$ 个忙用户监听信道后,发现信道空闲,发送后引起信道内数据包碰

撞;(3)信道传输检测时间到期,即所有的用户都已知信道中有数据发送. 上述事件任何一个先于另两个事件发生,便使系统转移入相应的状态.

定义以下几个事件:

$E1 : t_n < t_d; E2 : t_r < t_d; E3 : t_n < t_r$ 可以求得

$$P(E1) = 1 + \frac{2}{D \cdot (M - n)} \{ \exp[-(M - n) \lambda \cdot D] - \exp[-(M - n) \lambda \cdot \frac{D}{2}] \} \quad (1)$$

$$P(E2) = 1 + \frac{2}{D \cdot (n - 1) R} \{ \exp[-(n - 1) R \cdot D] - \exp[-(n - 1) R \cdot \frac{D}{2}] \} \quad (2)$$

$$P(E3) = \frac{(M - n) \lambda}{(M - n) \lambda + (n - 1) R} \quad (3)$$

系统由 (n, TS) 跳转到 (n, S) 的转移概率为:

$$Ps(n) = [1 - P(E1)] [1 - P(E2)] \quad (4)$$

系统由 (n, TS) 转到 $(n + 1, C)$ 的转移概率为

$$Puc(n) = (1 - Ps(n)) \cdot P(E3) \quad (5)$$

系统由 (n, TS) 跳转到 (n, C) 的转移概率为

$$Pc(n) = (1 - Ps(n)) \cdot [1 - P(E3)] \quad (6)$$

同样,可以得到各状态之间的转移概率:

$$Pist(n) = \frac{(M - n) \lambda}{(M - n) \lambda + nR} \quad (7)$$

$$Pcc(n) = Pss(n) = 1 - \exp[-(M - n) \lambda \cdot T] \quad (8)$$

3.4 嵌入式马尔可夫链稳态概率

定义系统处于 $K = (n, U)$ 状态的嵌入式马尔可夫链稳态概率为 $\pi_{(n, U)}$,系统由 $K = (n, U)$ 状态转移到 $L = (m, Q)$ 状态之间的转移概率为 $P(K/L)$.

其中 $U, Q \in \{I, TS, S, C\}$,

$m, n \in \{0, 1, 2, \dots, M\}$,参见文[5],

$$\pi_{(n, U)} \cdot P(K) = \sum_{L \in K} \pi_{(m, Q)} \cdot P(L/K) \quad (9)$$

$$\sum_{n \in \{0, 1, 2, \dots, M\}} \sum_{U \in \{I, TS, S, C\}} \pi_{(n, U)} = 1 \quad (10)$$

其中 $P(K) = \sum_{L \in K} P(K/L)$. 利用上述(9), (10)方程,循环计算,就能计算出系统各状态的嵌入式马尔可夫链稳态概率.

2.5 由嵌入式马尔可夫链向半马尔可夫链转化

(1) 状态平均停留时间

为了求得系统各状态在任意时刻的稳态解,必须引入状态平均停留时间. 定义状态平均停留时间为 $T_{(n, U)}$,则:

$$T_{(n, U)} = \frac{P(K/L)}{L \in K} \cdot t(K/L) \quad (11)$$

$P(K/L)$ 为系统从 $K = (n, U)$ 状态转移到 $L = (m, Q)$ 状态的转移概率; $t(K/L)$ 为系统从进入到 $K = (n, U)$ 状态直至转移到 $L = (m, Q)$ 状态的在 $K = (n, U)$ 状态的平均停留时间. 可以求得:

$$T_{(n, TS)} = E(t_{TS}) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \{ [(i - 1) \cdot t + t/2] \cdot [F_{TS}(i \cdot t) - F_{TS}((i - 1) \cdot t)] \} \quad (12)$$

$$T_{(n, I)} = \frac{1}{(M - n) \lambda + nR} \quad (13)$$

$$T_{(n,s)} = T_{(n,c)} = P_{ss}(n) \left\{ \frac{1}{(M-n)} - \frac{T \exp[-(M-n) \cdot T]}{1 - \exp[-(M-n) \cdot T]} \right\} + [1 - P_{ss}(n)] \cdot T \quad (14)$$

(2) 半马尔可夫链模型稳态概率

半马尔可夫链模型中,各状态的稳态概率与状态转移概率和状态停留时间有关,系统处于 $K = (n, U)$ 状态的概率为^[8]:

$$\phi_{(n,U)} = \frac{(n,U) \cdot T_{(n,U)}}{\sum_{m=0}^M \sum_{\{1,TS,S,C\}} T_{(m,Q)}} \quad (15)$$

3 空地数据链系统性能分析

信道状态概率:系统的信道状态有 I, TS, S, C 四种状态,信道停留在各状态的稳态概率为:

$$L_U = \sum_{n=0}^M \phi_{(n,U)} \quad (16)$$

吞吐量:在地空数据链中,系统的吞吐量定义为在数据包发送时间 T 内,被成功发送的数据包的个数。按第二节的分析,即是系统的信道处于安全传送的概率。系统的吞吐量为:

$$Th = \sum_{n=0}^M \phi_{(n,S)} \quad (17)$$

系统中的忙用户数目:系统中的忙用户数目可以用来观察系统的拥挤程度,了解系统中处于等待或发送状态的用户数目。忙用户数目为:

$$Bu = \sum_{n=0}^M n \cdot \sum_{U \{I,TS,S,C\}} \phi_{(n,U)} \quad (18)$$

用户的发送延时:利用 Litter 公式^[7],用户发送的延时为:

$$De = Bu / Th \quad (19)$$

这样得到的单位是数据包的个数,将其转化为时间单位更为直观。

$$De = Bu \cdot T / Th \quad (20)$$

4 数值分析结果与讨论

根据以上模型,对 VHF 数据链的性能指标进行了数值计算。对于 VHF 空地数据链,地面站的覆盖半径约为 300 公里,选取飞机总数目 M 为 50 架,而飞机下发的数据包的长度为 450 字节,数据链的比特率为 2400bps,飞机产生新报文的平均时间间隔为 1 分钟,最大传输延时 $D = 2 \times 10^{-3}$ 秒。 t_d 在 $[D/2, D]$ 内服从均匀分布。 t_d 的均值为 1.5×10^{-3} 秒,报文的发送时间 $T = 1.5$ 秒。

图 2 给出了报文长度服从负指数分布的情况下,信道传输检测时间的分布对系统的吞吐量的影响。在较低的负载下,系统的性能十分接近,随着监听密度的提高,信道的吞吐量越过顶峰后,两者的差距开始明显。

信道传输检测时间是一个极为关键的指标,一般又称之为“碰撞窗口”。当系统的负载并不大时,“碰撞窗口”对系统的吞吐量的影响不大;但当负载加重,用户的数据包到达率提高,用户的监听密度提高时,“碰撞窗口”的大小对系统的性能的影响就比较显著了。“碰撞窗口”愈小,系统中发生碰撞的概

率愈小,系统的吞吐量愈大。由图 2 可以看出,当信道传输检测时间服从负指数分布时,相对于信道传输检测时间服从均匀分布,“碰撞窗口”减小,系统可以承受较大的负载,系统的吞吐量下降较为缓慢。

图 3 给出了信道传输检测时间服从负指数分布的情况下,报文长度分布对系统的吞吐量的影响。在较低的报文发送率和较低的监听密度条件下,报文长度为定长的曲线的吞吐量较大,当监听密度提高时,两者趋于一致。

针对 VHF 数据链的实际情况,选择报文长度为定长,信道传输检测时间的分布为均匀分布。在这种情况下,与传统的按报文长度和信道传输检测时间均服从负指数分布,监听密度与吞吐量关系如图 4 所示。

图 5、6 为在四种不同的条件下,系统在报文平均发送延时和忙用户数目的差异。A、B、C、D 四条曲线分别对应:(1) A 条件:报文的长度为定值,信道传输检测时间为在 $[D/2, D]$ 内服从均匀分布;(2) B 条件:报文的长度为定值,信道传输检测时间服从负指数分布;(3) C 条件:报文的长度服从负指数分布,信道传输检测时间为在 $[D/2, D]$ 内服从均匀分布;(4) D 条件:报文的长度和信道传输检测时间服从负指数分布。

图 5、6 中的 C、D 曲线在较低的监听密度时,明显低于 A、B 曲线。这说明当报文的长度服从负指数分布时,相对于报文长度的定长分布,即系统中存在着大量的短报文,在新报文到达率较低,监听密度较低时,能有效的降低系统中忙用户数目,从而降低报文发送延时。

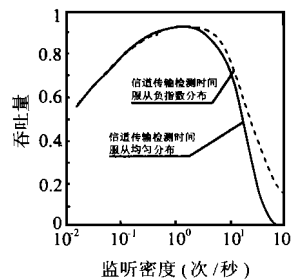


图 2 信道传输检测时间的分布对吞吐量的影响曲线

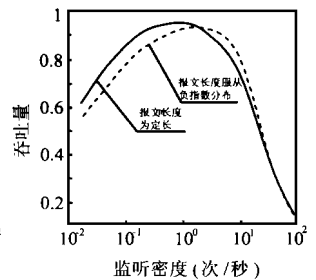


图 3 报文长度的分布对吞吐量的影响曲线

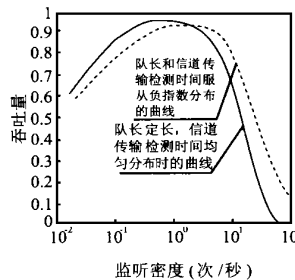


图 4 两种系统参数不同分布下对吞吐量的影响曲线

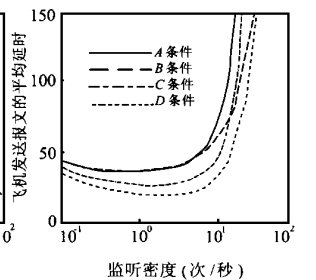


图 5 四种条件下对发送报文延时的影响

图 7 为系统在各状态的稳态概率随监听密度变化的曲线。实、虚线分别对应图 5 的条件 A 和条件 D。图中系统信道状态的交替变化的情况非常明显。随监听密度的提高,系统的信道处于空闲的概率减小,信道处于安全传送的概率提高,碰

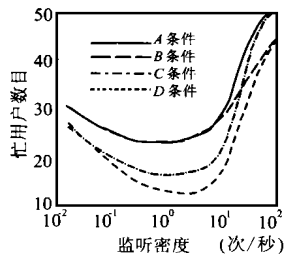


图 6 四种条件下对忙用户数的影响

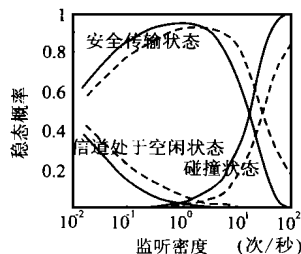


图 7 各状态稳态概率随监听密度的变化

撞概率增长缓慢,吞吐量越过顶峰后,碰撞概率迅速增长,信道处于安全传送的概率急剧降低。

5 结论

本文通过新的半马尔可夫模型分析方法,从而放宽了 VHF 地空数据链信道访问协议分析中的部分参数条件限制。通过建模和仿真,采用 VHF 地空数据链中的实际参数,对其信道访问协议的性能进行了分析和评价,研究了系统不同参数分布下对空地数据链性能的影响。

研究表明,系统在地空数据链的报文到达率条件下,监听密度较低时,报文长度的分布对系统性能影响明显,当处于较高的监听密度时,信道传输检测时间的分布对系统影响显著。

参考文献

- [1] Aeronautical Radio Inc. Air/ground character oriented protocol specification: ARINC Specification 618 ~ 2, Dec. 1996
- [2] Kleinrock L, Tobagi F A. Packet switching in radio channels: Part I Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics. IEEE Trans. on Communications, 1975, 23(12): 1400 ~ 1433

- [3] Meditch J S, Chiu-Tau A L. Stability and optimization of the CSMA and CSMA/CD channels. IEEE Trans. on Communications, 1983, 31(6): 763 ~ 774
- [4] Apostolopoulos T K, Protonotarios E N. Queueing analysis of buffered slotted multiple access protocols. IEEE Trans. on Communications, 1986, 34(9): 898 ~ 905
- [5] Coyle E J, Bede L. A matrix representation of CSMA/CD networks. IEEE Trans. on Communications, 1985, 33(1): 53 ~ 64
- [6] Steven L B, Edward J C. The delay characteristics of CSMA/CD networks. IEEE Transactions On Communications, 1988, 36(5): 553 ~ 563
- [7] 孟玉珂. 排队论基础及应用. 上海: 同济大学出版社, 1989
- [8] Mudge T N, AF Sadoun H B. A semi-Markov model for the performance of multiple-bus system. IEEE Trans. on Computer, 1985, 34(10): 934 ~ 942



张 军 1990 年在北京航空航天大学电子工程系获得硕士学位, 现任北京航空航天大学电子工程系副主任, 副教授, 主要研究领域: 航空数据通信, 数据链技术, 新航行系统, 遥控遥测等。



方 新 1997 年毕业于浙江大学, 同年入北京航空航天大学电子工程系攻读硕士学位。其主要研究领域: 信息传输与处理。

(上接第 83 页)

- [5] 王军. 基于 $E_n - I_n$ 模式的电子线路噪声分析理论的研究. 博士学位论文, 吉林工业大学, 1997, 6
- [6] 戴逸松, 丁宏, 张新发. 仪器仪表学报, 1995, 16(3): 231 ~ 236
- [7] A Boudiaf and M Laporte. IEEE Trans. on IM, 1993, 42(2): 532 ~ 537
- [8] 王军, 戴逸松. 仪器仪表学报, 1998, 19(4): 352 ~ 357
- [9] 王军, 戴逸松. 电子学报, 1998, 26(1): 73 ~ 76
- [10] 周文表. 微波集成电路计算机辅助设计手册. 北京: 人民邮电出版社, 1988, 5