

地空数据链组网的稳定性研究

林 健, 夏靖波, 刘 勇

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘 要:研究了地空数据链稳定性的影响因素,根据系统链路各个影响因素的故障模式概率分布,衍生出确定每个节点发送和接收数据的稳定性分析方法,最后以三节点数据链系统模型为例,对其在多种状态下进行稳定性分析,得出了地空数据链的稳定性指标。

关键词:数据链;稳定性;故障模式

中图分类号: TP919 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009 - 3516(2007)04 - 0069 - 03

1 数据链简介

地空数据链作为连接 C⁴ISR 各成员的节点,在信息收集、分发、处理和共享中起着至关重要的作用。“数据”而言,它包括传输与终端设备、通信协议和消息标准三大要素^[1,2];就“链”而言,它还包括对信息源、指挥控制系统和武器平台的嵌入、信息处理和显示控制等设施。

2 数据链组网稳定性模型

假设:数据接收和发送是在固定的时间内进行;数据由单独指控发送中心向 n 个节点分发;数据链各个节点相互独立^[3]。

定义:设随机变量 X_j 代表数据链中接收数据各个节点, $j = 1, 2, \dots, n$; 随机变量 Y_j 代表数据链发送数据各个节点; F_j 是数据发送节点 j 的概率分布; G_j 是数据接收节点 j 的概率分布; Ω 为包含所有数据链中传输结果的样本空间; ω_{ij} 为由发送节点 j 向接收节点 i 的传输结果; P_j 为发送节点 j 的故障概率。

地面电台作为数据分发中心,处在链路梯队的高层,负责发送命令和控制 n 个底层收发节点,根据图 1 所示的数据链系统,由于 $n = 3$,则样本空间数为 8:

$$\Omega_1 = (1, 1, 1), \Omega_2 = (1, 1, 0), \Omega_3 = (1, 0, 1), \Omega_4 = (0, 1, 1), \Omega_5 = (1, 0, 0), \Omega_6 = (0, 1, 0), \Omega_7 = (0, 0, 1), \Omega_8 = (0, 0, 0)$$

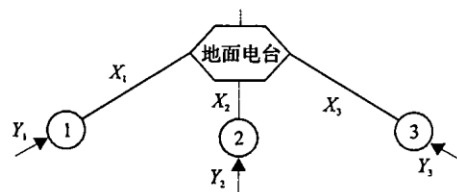


图1 三节点地空数据链系统模型

假设每条链路对于执行任务的能力都是同等的。这里,将要考虑 3 种状态下系统故障模式:串行系统 (series), 并行系统 (parallel), 条件约束系统 (n 条链路中 k 个节点正常,则整个系统正常,即 $k - out - of - n$, 对于 3 个节点的系统来说为 $2 - out - of - 3$), 对于每种状态下的故障和概率表达式如表 1 所示。

对于串行链路数据链系统,从表 1 可以看出,对于样本空间中事件 $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_8$, 整个系统故障,因此样本空间中事件 Ω_1 是唯一使得系统正常的事件,故系统的稳定性为

收稿日期:2006 - 12 - 1

作者简介:林 健(1980 -),男,浙江温州人,博士生,主要从事地空数据链的应用研究;

夏靖波(1963 -),男,河北秦皇岛人,教授,博士生导师,主要从事网络管理及网络安全技术研究。

$$R_s = q_1 q_2 q_3 \quad (1)$$

对于并行链路数据链系统,从表1可以看出,它的故障模式与串行链路数据链系统是互补的,只有在事件 Ω_8 时,处于故障状态,故稳定性为

$$R_p = 1 - p_1 p_2 p_3 \quad (2)$$

对于条件约束数据链系统,从表1可以看出,在 $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_4$ 整个系统正常,故系统稳定性为

$$R_{213} = \bigcup_{j=1}^4 P(\Omega_j) \quad (3)$$

表1 三节点数据链系统故障模式

i	Ω_i	$P(\Omega_i)$	系统故障		
			series	parallel	2-out-of-3
1	(1,1,1)	$q_1 q_2 q_3$	正常	正常	正常
2	(1,1,0)	$q_1 q_2 p_3$	故障	正常	正常
3	(1,0,1)	$q_1 p_2 q_3$	故障	正常	正常
4	(0,1,1)	$p_1 q_2 q_3$	故障	正常	正常
5	(1,0,0)	$q_1 p_2 p_3$	故障	正常	故障
6	(0,1,0)	$p_1 q_2 p_3$	故障	正常	故障
7	(0,0,1)	$p_1 p_2 q_3$	故障	正常	故障
8	(0,0,0)	$p_1 p_2 p_3$	故障	故障	故障

3 两种故障条件下的系统性能分析

3.1 几何分布

通常情况下,数据链系统在正常状态且在不受外界干扰时,其数据发送和接收服从几何分布^[4],设 X_j 和 Y_j 是独立的随机变量,它们的概率分布分别为 $F_j(x)$ 和 $G_j(y)$,其中 $j=1,2,\dots,n$ 。样本空间:

$$\Omega = \{(\omega_{ij}; j=1,2,\dots,n); i=1,2,\dots,2^n\}, \omega_{ij} = \begin{cases} 1, X_j < Y_j (j=1,2,\dots,n) \\ 0, X_j \geq Y_j \end{cases} \quad (4)$$

节点 j 发生故障的联合概率密度为

$$P_j = \begin{cases} \sum_{j=0}^{\infty} F_j(\gamma) g_j(\gamma), & (X_j, Y_j) \text{ 离散} \\ \int_0^{\infty} F_j(\gamma) dG_j(\gamma), & (X_j, Y_j) \text{ 连续} \end{cases} \quad (5)$$

这是节点 j 发生故障的概率函数^[5],那么 $q_j = 1 - p_j$ 为节点 i 到 j 稳定概率,故障事件 $\Omega = \{(\omega_{ij}; j=1,2,\dots,n), i=1,2,\dots,2^n\}$ 的概率取决于对于特定条件下的地空数据链系统的发送点和接收点的概率分布。

设 X_j 和 Y_j 为正常状态下,数据链节点发送和接收数据的随机变量,满足几何分布,其离散概率函数为:

$$f_{X_j}(x) = \alpha_j (1 - \alpha_j)^x, x=0,1,\dots, g_{Y_j}(y) = \beta_j (1 - \beta_j)^y, y=0,1,\dots$$

那么: $F_{X_j}(x) = 1 - (1 - \alpha_j)^{x+1}, x=0,1,\dots$,由式(5)可知

$$P_j = \frac{\alpha_j}{\alpha_j + \beta_j - \alpha_j \beta_j} \quad (6)$$

将式(6)分别代入到式(1),(2),(3)中可以分别得到在串行系统(series)、并行系统(parallel)、条件约束系统下的稳定性结果:

$$R_s = \prod_{j=1}^3 \left(\frac{\beta_j (1 - \alpha_j)}{\alpha_j + \beta_j - \alpha_j \beta_j} \right) \quad (7) \quad R_p = \prod_{j=1}^3 \left(1 - \frac{\alpha_j}{\alpha_j + \beta_j - \alpha_j \beta_j} \right) \quad (8)$$

$$R_{213} = \prod_{j=1}^3 (\alpha_j + \beta_j - \alpha_j \beta_j) [\beta_1 (1 - \alpha_1) \alpha_2 \alpha_3 + \alpha_1 \beta_2 (1 - \alpha_2) \alpha_3 + \alpha_1 \alpha_2 \beta_3 (1 - \alpha_3)] \quad (9)$$

在正常状态系统不受外界干扰时,其数据的发送和接收满足几何分布。

3.2 Gamma 分布

考虑在实战条件下,数据链系统通常在敌方强电磁对抗下工作。根据数据统计,数据链节点的接收数据

的故障概率服从指数分布,其发送数据的故障概率服从 Gamma 分布^[4,6],那么数据发送和接收的概率密度函数为

$$f_{x_j}(x) = \frac{\lambda_j(\lambda_j)^{r_j-1}}{(r_j-1)!}e^{-\lambda_j x}, \lambda_j > 0, r_j = 1, 2, \dots, x \geq 0 \quad (10) \quad g_{y_j}(y) = \mu e^{-\mu y}, \mu > 0; y \geq 0 \quad (11)$$

则累积发送故障概率: $F_{x_j}(y) = \int_0^y \frac{\lambda_j(\lambda_j)^{r_j-1}}{(r_j-1)!}e^{-\lambda_j x} dx$ 。令 $w = \lambda_j x$, 那么 $dw = \lambda_j dx$, 则

$$F_{x_j}(y) = \int_0^{\lambda_j y} \frac{\lambda_j^{r_j-1}}{(r_j-1)!}e^{-w} dw = \left[1 - \left(1 + \lambda_j y + \frac{(\lambda_j y)^2}{2!} + \dots + \frac{\lambda_j^{r_j-1}}{(r_j-1)!} \right) e^{-\lambda_j y} \right] \quad (12)$$

将式(11)、(12)代入到式(5)中可以得到故障概率为

$$p_j = \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} \right)^{r_j+1}, r_j = 1, 2, \dots \quad (13)$$

4 实例分析

假设在某次实战中,有一个由单独指挥中心3个分布在不同位置的作战单元和组成的数据链系统^[7],其结构如图1所示。指挥中心接收数据的故障概率服从参数为 $\lambda = 0.01$ 和 $r = 2$ 的 Gamma 分布,数据链各个节点发送数据的故障概率服从参数为 $\mu = 50$ 的指数分布。

因而,在本例中, $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0.01, r_j = 2, \mu = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0.02$ 。单个节点的故障概率为:

$$p_j = \left(\frac{0.01}{0.01 + 0.02} \right)^{2+1} = \frac{1}{27}$$

由于数据点各个节点并行分布,所以系统整体稳定性 $R_p = (1 - p_j)^3 = \left(\frac{26}{27} \right)^3 = 0.893$ 。

实例表明,本数据链系统的整体稳定性较好,数据收发可靠性高。

参考文献:

- [1] 孙义明,杨丽萍. 信息化战争中的战术数据链[M]. 北京邮电大学出版社,2005.
- [2] 张学渊,梁雄健. 关于通信网可靠性的研究方法[J]. 通信学报,1995,18(4):54-56.
- [3] Haut, D G, IMcCurdy M. Modeling and Simulation for the New Pacific Community: A USPACOM Perspective[J]. Military Operations Research, 1994, 1:19-25.
- [4] Tayur, Ganeshan, Mafazine M. Quantative Models for supply Management[M]. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [5] Kapur, K C. L R. Lamberson, reliability in Engineering Design, John Wiley&sons
- [6] 丁武将. 数据链路体系研究[J]. 军队指挥自动化, 2002, (1):60-62.
- [7] 王 锋,廉保旺,丁在田. 基于 FDM-TDM 的 V/UHF 地空战术数据链研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2004,5(1):42-44.

(编辑:田新华,徐楠楠)

The Research on the Networking Reliability of Ground - to - air Data Link

LIN Jian, XIA Jing-bo, LIU Yong

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The parameters affecting networking reliability of ground - to - air data link are analyzed. Based on the probability distributions of failure conditions of such parameters, the reliability analysis method of each node is induced. Finally the three - node data link model is taken for example, its reliability is analyzed in several states and the reliability index is deduced.

Key words: data link; reliability; failure conditions