

文章编号: 1001- 2486(2010) 01- 0122- 05

JTIDS 数据链在部分频带干扰下的性能分析*

杨 光^{1,2}, 周经伦¹, 罗鹏程¹

(1. 国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073; 2. 海军工程大学 管理工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 联合战术信息分发系统(Joint Tactical Information Distribution System, 简称 JTIDS) 采用组合调制体制和多层编码体系保证报文传输的可靠性。分析了 JTIDS 数据链在莱斯衰落信道环境下的抗干扰性能, 并通过仿真分析了该系统在部分频带干扰下的符号误码率和报文丢失率。仿真结果显示, 由于 JTIDS 系统将 RS 编码、交织等多种编码技术和 DS/FFH MSK 调制技术相结合, 使其在复杂信道环境下保持较低的符号误码率及报文丢失率, 满足数据链报文传输可靠性的要求。

关键词: 数据链; 联合战术信息分发系统; 符号误码率; SIMULINK; 仿真

中图分类号: TP914 文献标识码: A

Performance Analysis of JTIDS with Partial Band Noise Interference

YANG Guang^{1,2}, ZHOU Jing-lun¹, LUO Peng-cheng¹

(1. College of Information System and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Department of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The combined modulation methods as well as various encoding methods adopted in Joint Tactical Information Distribution System (JTIDS) guaranteed the message transmission reliability. The anti-jamming performance of JTIDS on rice fading channel is analyzed; the symbol error rate and the message discarded rate of the system in partial band noise interference are derived by simulation. The simulation result shows that various anti-jamming technology such as RS encoding, and Interleaving and DS/FFH MSK modulation combined in JTIDS can improve the performance of data link communication so much that a lower symbol error rate and message discarded rate can be obtained in complex channel environment and the requirement of message transmission reliability is satisfied.

Key words: data link; JTIDS(Joint Tactical Information Distribution System); symbol error rate; SIMULINK; simulation

JTIDS^[1] (Joint Tactical Information Distribution System, 简称 JTIDS) 数据链采用了直序扩频、MSK 调制和快跳频的组合调制体制(简称 DS/FFH MSK 调制), 而且采用了 RS 编码、交织等多层编码体系使系统具有很强的抗干扰性, 从而保证 JTIDS 系统在复杂环境下报文传输的可靠性。文献[3]分析了 DS/FFH MSK 调制系统在高斯白噪声和多频干扰下的性能, 文献[5]在文献[3]的基础上分析了 DS/FFH MSK 系统在瑞利衰落信道环境和部分频带干扰下的性能, 文献[4]分析了 FFH/BPSK 调制系统在高斯白噪声和多频干扰下的比特误码率, 文献[6]在文献[4]的基础上考虑 RS 编码对性能的影响, 文献[7-8]分析了 FFH/MFSK 系统在多频干扰下的性能, 但 JTIDS 系统采用的是将 RS 编码、交织及 DS/FFH MSK 调制技术相结合的抗干扰体制, 其调制技术和编码技术较为复杂, 且由于 JTIDS 是一个视距系统, 因此采用莱斯衰落信道模型进行仿真分析。

1 JTIDS 系统报文传输可靠性评价模型

JTIDS 报文在发送端需要经过 RS 编码、分组交织、直序扩频、MSK 调制和跳频等过程以保证报文的可靠传输, 在接收端需要经过解跳、MSK 解调、直序解扩、解交织和 RS 解码等过程, 其具体流程如图 1 所示。以下将分别对各过程进行分析。

* 收稿日期: 2009- 06- 20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60701006); 国家部委资助项目(513040305)

作者简介: 杨光(1981-), 男, 博士。

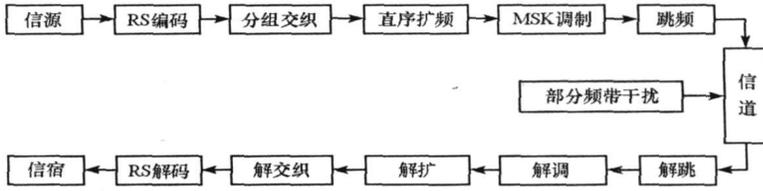


图1 JTIDS报文处理流程

Fig. 1 Procedure of JTIDS message process

1.1 编码系统性能分析

数据链采用了RS纠错编码,RS码是一种多进制BCH循环分组码。对于RS (n, k) 编码来说, n 为已编码分组(又称块)中总的符号(symbol)数, k 为编码前分组的符号数。如果每个符号由 m (m 是大于2的任意正整数)个比特组成,则对于所有的 n, k , 满足 $0 < k < n < 2^m + 2$ 。RS解码具有很强的纠错能力,对于大多数的RS (n, k) 码,存在 $(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - 2t)$, 其中 $t = \lfloor (n - k) / 2 \rfloor$ 是RS码能纠正的错误符号个数, $n - k = 2t$ 是监督符号个数, $\lfloor x \rfloor$ 表示小于或等于 x 的最大正整数。RS编码系统的符号误码率为^[2]

$$P_{s,RS} \approx \frac{1}{n} \sum_{j=t+1}^n j \binom{n}{j} p_s^j (1 - p_s)^{n-j} \quad (1)$$

其中, p_s 表示调制信道的符号误码率。

此外, JTIDS系统采用分组交织,分组交织是行读列出或列读行出的交织器。信息经过交织矩阵与解交织矩阵的变换后,原来信道中产生的突发错误变成了无记忆的随机性的独立差错。

分组交织器的分组长度可表示为 $p \times q$, 故又称之为 (p, q) 分组交织器。它将分组长度 L 分成 p 列 q 行,并构成一个交织矩阵,交织深度为 q ,从发送端发来的信息经过交织解交织后,就会将在传输过程中产生的突发差错变为无记忆的独立差错。对于RS (n, k) 编码,能纠正的错误符号个数为 $t = \lfloor (n - k) / 2 \rfloor$, 当使用交织深度为 q 的 (p, q) 分组交织器时,则结果变为RS (qn, qk) 码^[2],可以纠正多达 qt 个符号的突发差错,则经过RS编码和字符交织之后的符号误码率为

$$P_{s,RS+IW} \approx \frac{1}{qn} \sum_{j=qt+1}^{qn} j \binom{qn}{j} p_s^j (1 - p_s)^{qn-j} \quad (2)$$

JTIDS系统采用的是RS $(31, 15)$ 编码和 $(31, 3)$ 分组交织,则有 $n = 31, k = 15, m = 5, p = 31, q = 3, t = 8$,根据式(2),可得符号误码率为

$$P_{s,RS+IW} \approx \frac{1}{93} \sum_{j=25}^{93} j \binom{93}{j} p_s^j (1 - p_s)^{93-j} \quad (3)$$

1.2 调制系统性能分析

JTIDS系统的调制过程包括直序扩频、MSK调制和快跳频过程(简称DS/FFH MSK调制),其中, JTIDS系统采用 $(32, 5)$ 的CCSK扩频码进行直序扩频,扩频系数为6.4,它是由一条长为32位的CCSK码去对应5bit信息位,即CCSK码的32条位移序列与5bit信息位的32个状态一一对应。由此可见, JTIDS系统报文传输是以符号为单位进行调制的,一个符号对应5bit信息位。可以推导出JTIDS采用的DS/FFH MSK调制系统在莱斯信道环境下的符号误码率,其具体的推导过程参见文献[4],以下给出符号误码率的表达式:

$$p_s = \int_0^\infty Q(\sqrt{z}) p(z) dz \quad (4)$$

其中, z 为瞬时信噪比, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{\sqrt{2}}{2}x}^\infty e^{-t^2} dt, -\infty < x < \infty$, $p(z)$ 表示莱斯衰落信道中瞬时信噪比的概率密度函数,其表达式为

$$p(z) = \frac{1+K}{z} \exp\left[-K - \frac{z}{z}(1+K)\right] I_0\left[2\sqrt{(K^2+K)\frac{z}{z}}\right] \quad (5)$$

其中, z 表示平均信噪比, K 为莱斯因子, 表示视距传播路径的能量与反射多径的能量的比值, K 因子越大, 表示发送端和接收端之间的视距传播路径的能量越强, K 取值一般为 10~20dB, $I_0(x)$ 是第一类零阶修正贝塞尔函数, $I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{x \cos t} dt$ 。

考虑部分频带干扰的干扰频带只占扩展频谱传输带宽的一部分, 假设 μ 表示干扰信号带宽与信号带宽的比值(如果部分频带干扰的干扰带宽覆盖 l 个跳频点, 则 $\mu = l/F$, F 表示系统跳频点个数), 当考虑频带干扰时, 平均信噪比 z 表示为

$$z_I = \frac{1}{\frac{1}{3mN} \sum_{i=2}^L e^{-(i-1)\delta} + \left(\frac{2E_s}{n_I}\right)^{-1} + \left(\frac{2E_s}{n_0}\right)^{-1}} \quad (6)$$

当不考虑频带干扰时, 平均信噪比 z 表示为

$$z_N = \frac{1}{\frac{1}{3mN} \sum_{i=2}^L e^{-(i-1)\delta} + \left(\frac{2E_s}{n_0}\right)^{-1}} \quad (7)$$

其中, m 表示一个符号占用的 bit 信息位, N 为扩频率, L 为路径条数, δ 为衰落速率, E_s 为信号在每符号内的能量, $n_0/2$ 为高斯白噪声的双边功率谱密度, $n_I/2$ 为干扰噪声的双边功率谱密度。

另外, 由于一个符号通过一个脉冲传输, 假设 P 表示信号脉冲功率, R 表示信号脉冲速率, 则 $E_s = P/R$; 假设干扰噪声在其带宽内服从均匀分布, 则 $n_I/2 = P_I/2\mu W_{SS}$, 其中, 信干比 $SIR = P/P_I$, $W_{SS} = FW_{DS}$, 以 W_{SS} 表示跳频信号带宽, W_{DS} 表示扩频信号带宽, F 表示跳频点个数, 则有

$$\frac{E_s}{n_I} = \frac{\mu W_{SS}}{R} \cdot SNR \quad (8)$$

又因为占空比

$$\rho = \frac{T_s}{T_p} = \frac{mNT_c}{T_p} = \frac{mN/2W_{DS}}{1/R} = \frac{mNR}{2W_{DS}} \quad (9)$$

其中, T_p 表示脉冲周期。则

$$\frac{E_s}{n_I} = \frac{\mu FN}{2\rho} SIR \quad (10)$$

且 $E_s/n_0 = SNR$ 表示信噪比。

考虑到 RS 编码的冗余度, 假设 RS 编码前的符号能量为 E_s , 则经 RS 编码后每个符号的能量为 $E_s R_c$, 其中 $R_c = k/n$ 表示 RS 编码速率。因此, 对于有 RS 编码的系统来说, 有

$$\begin{aligned} z_I &= \frac{1}{\frac{1}{3mN} \sum_{i=2}^L e^{-(i-1)\delta} + \left(\frac{2R_c E_s}{n_I}\right)^{-1} + \left(\frac{2R_c E_s}{n_0}\right)^{-1}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{3mN} \sum_{i=2}^L e^{-(i-1)\delta} + \left(\frac{\mu k F m N}{\rho n} \cdot SIR\right)^{-1} + \left(\frac{k}{n} \cdot SNR\right)^{-1}} \end{aligned} \quad (11)$$

且

$$z_N = \frac{1}{\frac{1}{3mN} \sum_{i=2}^L e^{-(i-1)\delta} + \left(\frac{2R_c E_s}{n_0}\right)^{-1}} = \frac{1}{\frac{1}{3mN} \sum_{i=2}^L e^{-(i-1)\delta} + \left(\frac{k}{n} \cdot SNR\right)^{-1}} \quad (12)$$

因此, 对于部分频率干扰, 总的符号误码率为

$$P_s = \mu P_{s,I} + (1-\mu) P_{s,N} \quad (13)$$

其中, $P_{s,I}$ 和 $P_{s,N}$ 分别表示报文经过 JTIDS 的编码和调制系统之后在有频带干扰和无频带干扰情况下的

符号误码率。

根据式(1)、(2), 报文丢失率可表示为

$$R_M \approx 1 - \sum_{j=q+1}^{qn} \binom{qn}{j} p_s^j (1 - p_s)^{qn-j} \quad (14)$$

如果考虑部分频带干扰, 则报文丢失率可表示为

$$R_M = \mu R_{M,I} + (1 - \mu) R_{M,N} \quad (15)$$

其中, $R_{M,I}$ 和 $R_{M,N}$ 分别表示报文经过 JTIDS 的编码和调制系统之后在有频带干扰和无频带干扰情况下的报文丢失率。

综上所述, 结合式(1)、(2)、(4)、(11)、(12)、(13)、(14)、(15), 可建立 JTIDS 数据链报文传输可靠性的评价模型。对于 JTIDS 系统, 有 $m = 5$, 扩频率 $N = 6.4$, 跳频点个数 $F = 51$, $k = 15$, $n = 31$, $p = 31$, $q = 3$, $t = 8$, 占比 $\rho = 6.4/13$ 。

2 部分频带干扰下的仿真分析

基于以上的仿真模型进行仿真结果分析, 仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 抗干扰性能仿真参数设置

Tab. 1 Configuration of anti-jamming performance simulation parameters

| | | | |
|------------|--------------|----------|--------|
| m | 5 | μ | 0.1 |
| N | 6.4 | ρ | 6.4/13 |
| F | 51 | K | 10dB |
| $RS(n, k)$ | $RS(31, 15)$ | L | 2 |
| t | 8 | δ | 3 |
| p | 31 | SNR | 0~30dB |
| q | 3 | SIR | 0~30dB |

如图 2 所示, 曲线 a 、 b 、 c 分别表示未编码的调制系统、带有 RS 编码的调制系统以及带有 RS 编码与交织的调制系统三种抗干扰体制下, 符号误码率与信噪比的关系, 其中, $SIR = 20\text{dB}$, $\mu = 0.1$ 。随着信噪比增加, 曲线 b 和曲线 c 中符号误码率下降程度比曲线 a 有显著提高, 可见 RS 编码与交织能够极大地改善数据链系统的抗干扰性能, 保证数据链报文传输可靠性的要求。

如图 3 所示, 曲线 a 、 b 、 c 分别表示未编码的调制系统、带有 RS 编码的调制系统以及带有 RS 编码与交织的调制系统三种抗干扰体制下, 符号误码率与信干比的关系, 其中, $SNR = 20\text{dB}$, $\mu = 0.1$ 。随着信干比增加, 符号误码率逐渐下降, 当 $SIR > 10\text{dB}$ 时, 符号误码率逐渐趋于平稳。比较曲线 a 、 b 、 c 可知, 编码系统保证了信干比较低时, 系统的符号误码率仍然很低, 从而实现报文的可靠传输。

如图 4 所示, 曲线 a 、 b 、 c 分别表示 $SIR = 0\text{dB}$ 、 10dB 、 20dB 时, 报文丢失率与信噪比的关系, 报文丢失率随着信噪比的增大而降低。且 SIR 越大, 报文丢失率下降的程度越大, 可见当信干比足够大时, 信噪比对报文传输的影响更加明显。

如图 5 所示, 曲线 a 、 b 、 c 分别表示 $SNR = 10\text{dB}$ 、 20dB 、 30dB 时, 报文丢失率与信干比的关系, 报文丢失率随着信干比的增大而降低, 且逐渐趋于平稳。当 SNR 足够大时, 即使信干比较低, 报文丢失率仍然很低, 从而实现报文的可靠传输。

3 结论

以美军联合战术信息分发系统(JTIDS)为背景, 研究了与 JTIDS 数据链报文传输可靠性相关的多层编码体系和组合调制体制, 提出了报文传输可靠性的评价模型, 分析了 JTIDS 系统在莱斯信道环境和部分频带干扰下的符号误码率和报文丢失率。分析结果显示, 由于 JTIDS 系统采用了 RS 编码、交织等多层编码体系以及 DS/FFH MSK 组合调制体制等一系列抗干扰技术, 使其在莱斯衰落信道环境及部分频

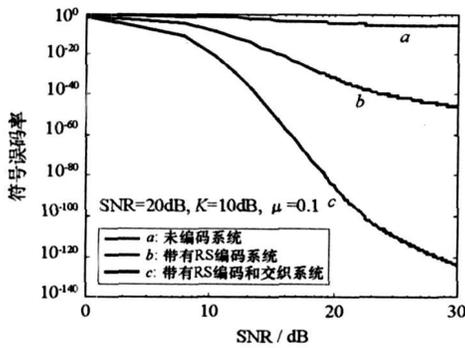


图2 符号误码率与信噪比的关系
Fig. 2 Symbol error rate vs. SNR

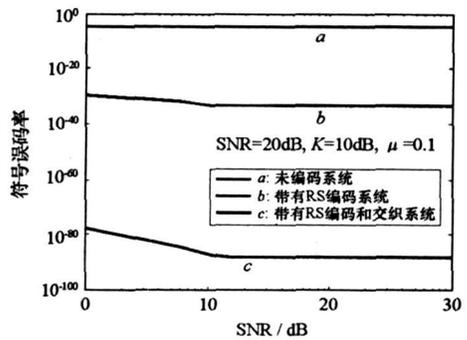


图3 符号误码率与信干比的关系
Fig. 3 Symbol error rate vs. SIR

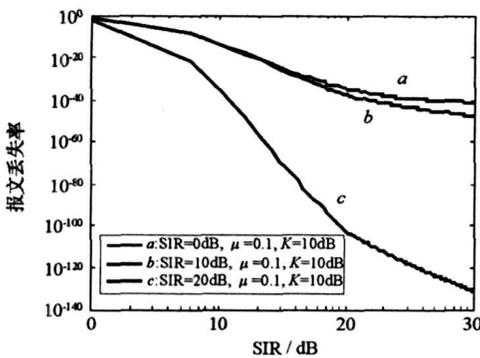


图4 报文丢失率与信噪比的关系
Fig. 4 Message discarded rate vs. SNR

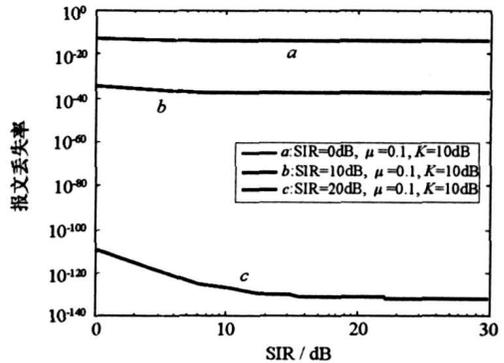


图5 报文丢失率与信干比的关系
Fig. 5 Message discarded rate vs. SIR

带干扰情况下,保持较低的符号误码率及报文丢失率,满足数据链报文传输可靠性的要求。但是由于数据链通信的信道环境复杂,干扰条件多样,进一步的工作将利用仿真分析 JTIDS 数据链采用不同传输模式在不同信道环境和干扰方式下的性能。

参考文献:

[1] SPANAG 5516. Tactical Data Exchange-Link16[R].
 [2] Yuan D F, et al. Performance Analysis of RS-BCH Concatenated Codes in Rayleigh Fading Channel[C]// Communications, APCC/OECC' 99, 1999.
 [3] Zheng H, Zhang N. Performance Analysis of Hybrid DS-SFH/MSK Spread-spectrum System under Multitone Jamming[J]. Military Communications Conference, IEEE MILCOM, 1999: 567- 570.
 [4] Ryu H G. Effects of Partial-Band Interference on Hybrid DS/SFH MSK System in Rayleigh Fading Channel[J]. Electronics Letters, 2001, 37 (16) : 1039- 1041.
 [5] Shen Y S, Su S L. Performance Analysis of an FFH/BFSK Receiver with Product Combining in a Fading Channel under Multitone Interference[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 1536- 1276.
 [6] Kah C, Wei X. Performance Analyses of Reed-solomon Coded FFH/ BFSK Linear-combining Receiver over Multitone Jamming and AWGN Channels[J]. Military Communications Conference, IEEE MILCOM, 2000(1) : 149- 153.
 [7] Jiang C, Wang J Z. Performance Analysis of FFH/ MFSK Receivers with Self-normalization Combining in the Presence of Multitone Jamming[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, September 2002, 51(5) : 1120- 1127.
 [8] Han Y, Kah C. Error Probabilities and Performance Comparisons of Various FFH/MFSK Receivers With Multitone Jamming[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(5) .