

车载通信系统电磁兼容性评估模型构建与分析

张光硕¹, 张世巍², 秦阳榛¹, 乌扶临¹, 姜博¹, 路宏敏¹

(1. 西安电子科技大学 电子工程学院, 西安 710071; 2. 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: 针对现有无线通信系统电磁兼容性(EMC)评估方法或模型的局限性, 以及车载通信系统的实际需求, 考虑车载通信系统 EMC 评估的完整性与准确性, 构建了一种涉及工作环境、信号频谱、接收机灵敏度、天线隔离度和通信性能因素的五级评估模型。以某装甲车辆车载通信系统为例的验证实验表明, 该模型能够评估车载电台工作环境和信号频谱间是否存在干扰; 接收机灵敏度下降的计算误差为 5.8%; 车载天线隔离度的计算值与实测值吻合良好; 仿真分析了车载数字通信系统性能较优的调制模式和编码模式, 接收机灵敏度减小 6 dB 时, 车辆通信距离下降 50%。仿真结果和实测结果表明, 模型适用于装甲车辆车载通信系统的 EMC 评估。

关键词: 电磁场与微波技术; 装甲车辆; 无线通信系统; 电磁兼容性; 评估模型

中图分类号: U463.67; TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)05-1780-08

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230811

Construction and analysis of the electromagnetic compatibility evaluation model for vehicular communication systems

ZHANG Guang-shuo¹, ZHANG Shi-wei², Qin Yang-zhen¹, WU Fu-lin¹, JIANG Bo¹, LU Hong-min¹

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: Aiming at the limitations of existed electromagnetic compatibility (EMC) evaluation methods or models for wireless communication systems and the actual needs of vehicular communication systems, a five-level novel evaluation model including working environment, signal spectrum, receiver sensitivity, antenna isolation and communication performance is constructed considering the completeness and accuracy of EMC evaluation for vehicular communication systems. The performance of the constructed model is validated using the vehicular communication system of an armored vehicle as an example. The model can evaluate whether there is interference between the working environment and the signal spectrum of the vehicle-mounted radio station. The error in the reduction of the receiver sensitivity between calculation and measurement is 5.8%. The calculated isolation of the vehicle-mounted antenna is in good agreement with

收稿日期: 2023-08-03.

基金项目: 国防型研项目(JZX7X201901JY0048).

作者简介: 张光硕(1990-), 男, 博士研究生. 研究方向: 电磁场与微波技术, 电磁兼容.

E-mail: zhangguangshuoemc@stu.xidian.edu.cn

通信作者: 路宏敏(1961-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 电磁场与微波技术, 电子通信系统的电磁兼容.

E-mail: hmlu@mail.xidian.edu.cn

the measurements. The modulation mode and coding mode of the vehicle-mounted digital communication system with better performance are simulated and analyzed. When the receiver sensitivity is reduced by 6 dB, the vehicle communication distance is reduced by 50%. The simulation and measurement results show that the proposed model is suitable for the evaluation of EMC of vehicular communication systems for armored vehicles.

Key words: electromagnetic fields and microwave technology; armored vehicle; wireless communication system; electromagnetic compatibility; evaluation model

0 引言

随着科学技术的日益发展,车载电子设备数量不断增多。这一发展趋势在提升车辆智能化、网络化性能的同时,导致车辆通信系统所处的电磁环境越来越复杂,潜在电磁干扰(Electromagnetic interference, EMI)问题凸显^[1-5]。EMI会造成车载通信系统出现电磁兼容性(Electromagnetic compatibility, EMC)问题^[6-9],如通信质量下降、正常通信中断、系统性能下降等。因此,研究复杂电磁环境下车载通信系统的EMC评估问题,对于预测、控制甚至消除车载通信系统的EMI是非常必要的^[10-12]。

系统级EMC评估技术的发展可以追溯到20世纪60年代,学者们提出了诸多EMC评估模型,其中传统的四级评估模型^[13]最为经典且应用广泛。文献[14]提出了一种改进的四级评估模型。然而,随着车辆电子技术的发展,传统的评估模型已难以适应现代车载电子信息系统的EMC评估,特别是装甲车辆通信系统。

传统评估模型应用于装甲车辆通信系统的EMC评估和分析时存在以下不足之处:①未考虑车内多台电子设备同时工作时的相互叠加干扰对车辆EMC的影响;②未考虑车载多天线同时工作时,天线间实际隔离度是否满足EMC要求;③未考虑电台接收机灵敏度下降对系统EMC的影响;④未考实际复杂电磁环境对车辆通信距离的影响;⑤现有通信质量的评估指标不适用于数字通信系统。

针对装甲车辆通信系统的EMC评估需求,本文构建了一种新型装甲车辆通信系统EMC评估模型,该模型包含工作环境、信号频谱、接收机灵敏度、天线隔离度和通信性能5个维度的系统级EMC评估内容。

1 车载通信系统EMC评估模型构建

EMI可能发生在系统内部各子系统之间(系统内EMI),也可能存在于系统和外部环境之间(系统间EMI)^[15]。针对装甲车辆通信系统的EMC评估需求,构建评估模型时,主要考虑车载通信系统EMC评估的完整性与准确性。因此,评估过程分为5级:第一、二和四级针对系统内EMI,分别评估车载电台工作频率、信号频谱以及车载天线隔离度;第三级和第五级针对系统间EMI,分别评估车载电台接收机灵敏度和车辆通信性能。评估流程如图1所示。系统EMC可分为兼容、不兼容和临界兼容3种状态^[16]。一个系统是否存在干扰,可以用干扰余量(Interference

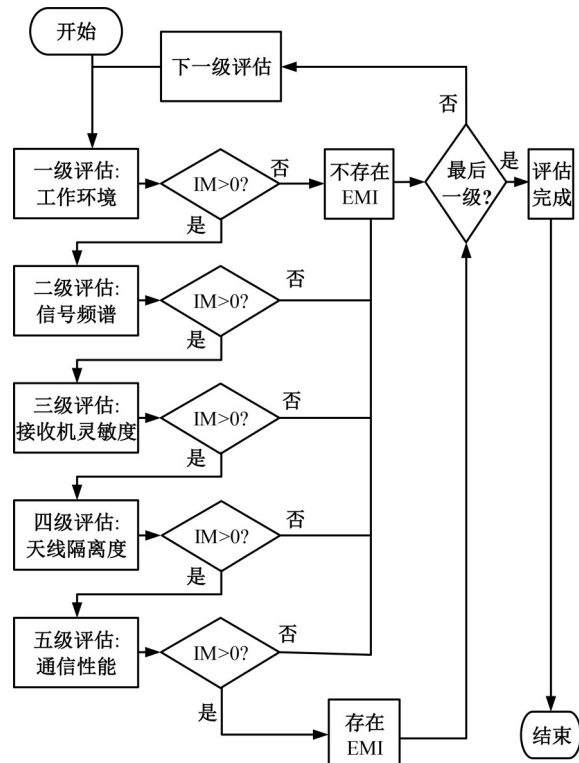


图 1 评估模型流程

Fig. 1 Flowchart of the proposed model

margin, IM)来描述。当 $IM > 0$ 时,系统中存在潜在的 EMI,可能出现电磁不兼容的状态;当 $IM = 0$ 时,系统中无法确定是否存在 EMI,处于临界电磁兼容状态;当 $IM < 0$ 时,系统不存在 EMI,处于电磁兼容状态。下文将分别介绍每一级的评估内容、方法和判据。

1.1 一级评估:工作环境评估

评估工作环境时,无需详细考察影响微弱的收发机,故本级评估根据系统中收发机的工作频率快速评估收发机之间是否存在 4 种干扰余量,并判别干扰类型^[15]。

$$|f_T - f_R| \leq 0.2f_R \quad (1)$$

$$\begin{cases} f_T < 10f_R \\ f_T > 0.1f \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} f_R < 10f_T \\ f_R > 0.1f \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} 0.1f_T < 10f_R \\ 10f_T > 0.1f_R \end{cases} \quad (4)$$

式中: f_T 为发射机的工作频率, MHz; f_R 为接收机的工作频率, MHz。

式(1)~(4)分别评估是否存在基波干扰余量(Fundamental interference margin, FIM)、发射机干扰余量(Transmitter interference margin, TIM)、接收机干扰余量(Receiver interference margin, RIM)和杂散干扰余量(Spurious interference margin, SIM)。若满足其中之一,则评估结果为 $IM > 0$,需要进行第二级评估。

1.2 二级评估:信号频谱评估

发射机信号经相互作用会产生基波信号、谐波信号、互调信号等分量,若这些信号分量落入接收机的接收频带内,就会产生 EMI^[14]。故本级评估收发机之间是否存在信号频谱干扰。

$$|f_T - f_R| \leq \frac{B_T + B_R}{2} \quad (5)$$

$$|nf_T - f_R| \leq \frac{B_{Tn} + B_R}{2}, n < 5 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \left| |mf_{T1} \pm nf_{T2}| - f_R \right| &\leq \frac{B_R + B_{T1m} + B_{T2n}}{2}, \\ 3 < m + n < 5 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: B_T 和 B_R 分别为发射机和接收机的基波带宽; B_{Tn} 为发射机的 n 阶谐波带宽; f_{T1} 和 f_{T2} 分别为发射机 1 和发射机 2 的工作频率, B_{T1m} 和 B_{T2n} 分别为发射机 1 的 m 阶谐波带宽和发射机 2 的 n 阶谐波带宽,单位均为 MHz。

式(5)~(7)分别评估基波信号干扰、谐波信号干扰和互调信号干扰。若满足其中之一,则评估结果为 $IM > 0$,需要进行第三级评估。

1.3 三级评估:接收机灵敏度评估

本级评估接收机灵敏度的减小量是否满足系统 EMC 限值要求。接收机受到 EMI 后,灵敏度下降^[17]。

接收机的接收功率需要考虑电波传播损耗、天线的极化失配损耗和馈源损耗 3 个因素。图 2 为车辆无线通信信号传播示意图。

接收机接收到的实际功率 P_r 为^[18]:

$$P_r = P_t - L_T + G_t - L_0 - L_C + G_r - L_R \quad (8)$$

式中: P_t 为发射机的发射功率, W; G_t 为发射天线的增益, dB; G_r 为接收天线的增益, dB; L_0 为电波自由空间传播的损耗, dB; L_C 为发射天线和接收端天线之间的极化失配损耗, dB; L_T 和 L_R 为馈源损耗, dB。自由空间传播损耗 L_0 由式(9)给出:

$$L_0 = 20\lg d + 20\lg f + 32.44 \quad (9)$$

式中: d 为通信距离, km; f 为工作频率, MHz。

天线的极化失配损耗 L_C 与发射和接收天线的极化类型和增益有关^[15],如表 1 所示。

馈源损耗(L_T 和 L_R)由式(10)~(11)给出:

$$\Gamma = \frac{V_{SWR} - 1}{V_{SWR} + 1} \quad (10)$$

$$L = 10\lg\left(\frac{1}{1 - |\Gamma|^2}\right) \quad (11)$$

表 1 天线极化失配损耗

Table 1 Antenna polarization mismatch loss

接收天线		水平极化		垂直极化		圆极化
		$G < 10$ dB	$G \geq 10$ dB	$G < 10$ dB	$G \geq 10$ dB	
水平极化	$G < 10$ dB	0	0	-16	-16	-3
	$G \geq 10$ dB	0	0	-16	-20	-3
垂直极化	$G < 10$ dB	-16	-16	0	0	-3
	$G \geq 10$ dB	-16	-20	0	0	-3
圆极化		-3	-3	-3	-3	0

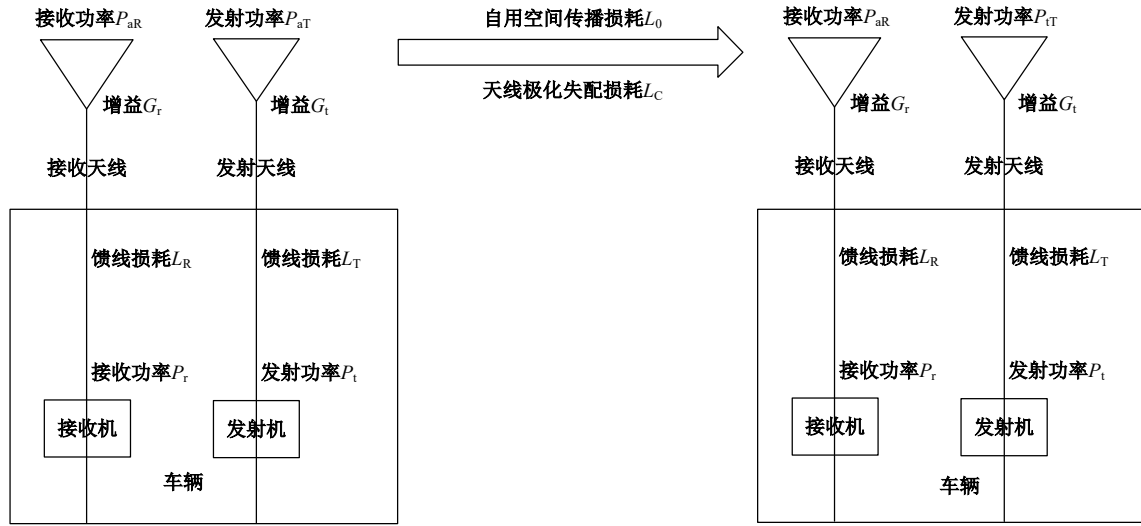


图 2 车辆通信传播示意图

Fig. 2 Vehicle communication propagation diagram

式中: V_{SWR} 为电台电压驻波比; Γ 为电压反射系数。

接收机灵敏度减小量 ΔS 由式(12)给出:

$$\Delta S = S - P_r \quad (12)$$

式中: S 为接收机标定灵敏度, dBm; ΔS 为接收机灵敏度的减小量, dB。

如果接收机灵敏度减小量大于系统 EMC 限值要求, 则评估结果为 $IM > 0$, 需要进行第四级评估。

1.4 四级评估: 天线隔离度评估

本级评估车载天线隔离度^[19,20]。天线隔离度反映天线间电磁信号耦合程度: 隔离度越高, 不同天线之间的相互干扰越小。车载天线距离近, 同时工作时, 隔离度会下降。

$$P_{aT} = P_t - L_T + G_t \quad (13)$$

$$P_{aR} = P_r - L_R + G_r \quad (14)$$

$$I = 10 \lg \frac{P_{aT}}{P_{aR}} \quad (15)$$

式中: I 为天线隔离度, dB; P_{aT} 为发射天线的实际发射功率, W; P_{aR} 为接收天线实际的接收功率, W。

如果天线隔离度小于系统 EMC 限值要求, 则评估结果为 $IM > 0$, 需要进行第五级评估。

1.5 五级评估: 通信性能评估

车载通信系统最重要的功能是与其它车辆、C³I 系统持续、有效地通信。故本级评估通信系统的性能包含通信距离和质量 2 个方面^[21]。

1.5.1 通信距离

通过式(8)(9)(12)可推出有无干扰下通信距离与接收机灵敏度减小量 ΔS 的关系为:

$$\frac{d}{d'} = 10^{\frac{-\Delta S}{20}} \quad (16)$$

式中: d' 为存在干扰时的实际通信距离, km; d 为无干扰时的通信距离, km。

1.5.2 通信质量

(1) 语音清晰度。信噪比 (Signal-to-noise ratio, SNR) 是评估模拟通信系统性能的关键指标。当电台采用语音通信时, 可用语音清晰度评估系统性能^[21,22], 其反映人耳感知的语音质量特征。

$$SNR = 10 \lg \frac{S}{N} \quad (17)$$

$$D = 1 - \exp[-0.06128(SNR + 12)^{1.6951}] \quad (18)$$

式中: D 为语音清晰度; S 为信号的功率, W; N 为噪声的功率, W; SNR 为信噪比, dB。

(2) 误码率。误码率 (Bit error rate, BER) 是评估数字通信系统性能的关键指标^[22]。影响误码率的因素很多, 如信道编码方式、信道环境或调制类型。根据不同调制类型的误码率计算公式如表 2 所示。不同调制类型和不同的信道编码方式对误码率的影响在下一节进行详细分析。

表 2 不同调制类型误码率

Table 2 BER of the different modulation types

调制方式	相干解调	非相干解调
2ASK	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{\text{SNR}}}{2}\right)$	$\frac{1}{2} e^{-\frac{\text{SNR}}{4}}$
2FSK	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\text{SNR}}{2}}\right)$	$\frac{1}{2} e^{-\frac{\text{SNR}}{2}}$
2PSK	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\text{SNR}})$	/
2DPSK	$\operatorname{erfc}(\sqrt{\text{SNR}})$	$\frac{1}{2} e^{-\text{SNR}}$

注: $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$

2 车载通信系统 EMC 评估模型验证

使用所构建的模型对一号车辆的车载通信系

统进行系统级 EMC 评估,二号车辆作为评估时的辅助车辆。两车的车载电台、天线参数以及性能指标要求如表 3 和表 4 所示。

表 3 一号车辆电台参数和性能指标

Table 3 Vehicle 1 radio parameters and performance indicators

1号短波电台(HF1)		2号超短波电台(VHF2)		3号超短波电台(VHF3)		性能指标	
工作状态	发射	工作状态	发射	工作状态	接收	通信距离/km	15~30
工作频率/MHz	15	工作频率/MHz	45	工作频率/MHz	53	天线隔离度/dB	≥ 20
发射功率/W	50	发射功率/W	50	灵敏度/dBm	-116	灵敏度下降/dB	≤ 6
带宽/MHz	3	带宽/MHz	10	带宽/MHz	15		
驻波比	1.5	驻波比	1.5	驻波比	1.5		
天线增益/dB	1	天线增益/dB	1	天线增益/dB	1		
天线极化方式	垂直极化	天线极化方式	水平极化	天线极化方式	垂直极化		

表 4 二号车辆电台参数

Table 4 Vehicle 2 radio parameters

4号超短波电台(VHF4)		5号短波电台(HF5)	
工作状态	发射	工作状态	接收
工作频率/MHz	80	工作频率/MHz	11
发射功率/W	50	灵敏度/dBm	-107
带宽/MHz	17	带宽/MHz	3
驻波比	1.5	驻波比	1.5
天线增益/dB	1	天线增益/dB	1
天线极化方式	垂直极化	天线极化方式	垂直极化

2.1 一级评估:工作环境评估

选择电台 HF1 与 VHF3、VHF2 与 VHF3 组成两组收发对,利用式(1)~(4)进行计算,结果如表 5 所示。因此,第一级评估结果为 $IM > 0$,需要进行第二级评估。

2.2 二级评估:信号频谱评估

选择电台 HF1 与 VHF3、VHF2 与 VHF3 以及 HF1、VHF2 与 VHF3 组成 3 组收发对,利用式(5)~(7)进行计算,结果如表 6 所示。因此,第二

表 5 一级评估计算结果

Table 5 Calculation result of the first-level evaluation

收发对	FIM	TIM	RIM	SIM
HF1 和 VHF3	不存在	存在	存在	存在
VHF2 和 VHF3	存在	存在	存在	存在

表 6 二级评估计算结果

Table 6 Calculation result of the second-level evaluation

收发对	基波信号	谐波信号	互调信号
	干扰	干扰	干扰
HF1 和 VHF3	不存在	存在	/
VHF2 和 VHF3	存在	不存在	/
HF1、VHF2 和 VHF3	/	/	存在

级评估结果为 $IM > 0$,需要进行第三级评估。

2.3 三级评估:接收机灵敏度评估

本级评估一号车辆接收机 VHF3 的灵敏度减小量。当二号车辆的发射机 VHF4 与一号车辆的接收机 VHF3 进行通信时,发射机 VHF4 在自由空间电波传播的损耗 L_0 可以通过式(9)得到。VHF4 和 VHF3 的收发天线间极化失配损耗 $L_C = 0$,馈源损耗 $L_T = 0.51$ 和 $L_R = 0.51$ 。接收机 VHF3 实际接收功率 P_r 和灵敏度减小量 ΔS 的计算和实测结果对比分别如图 3 和图 4 所示。

由图 4 可知,接收机 VHF3 灵敏度减小量超过 6 dB 的通信距离计算值为 16.3 km,实测值为 15.4 km,两者误差 5.8%。根据系统 EMC 指标要求,接收机灵敏度减小量需 ≤ 6 dB,故评估结果 $IM > 0$,需要进行第四级评估。

2.4 四级评估:天线隔离度评估

本级评估一号车辆的车载天线隔离度。接收机 VHF3 与发射机 HF1、VHF2 的天线隔离度计

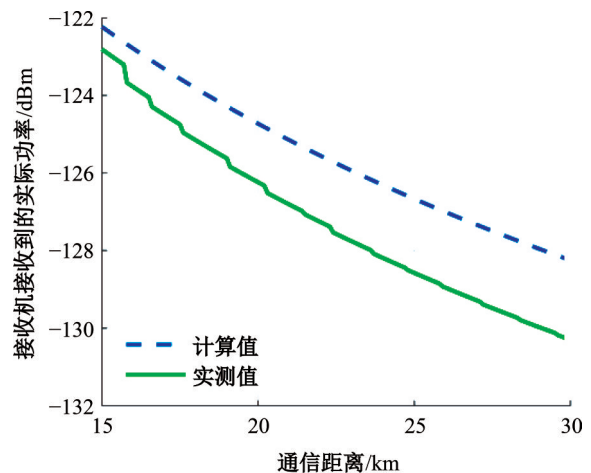


图 3 接收机 VHF3 接收的实际功率

Fig. 3 Actual power received by the receiver VHF3

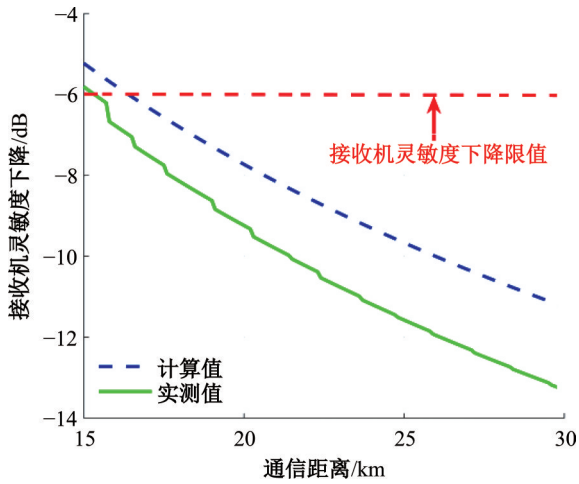
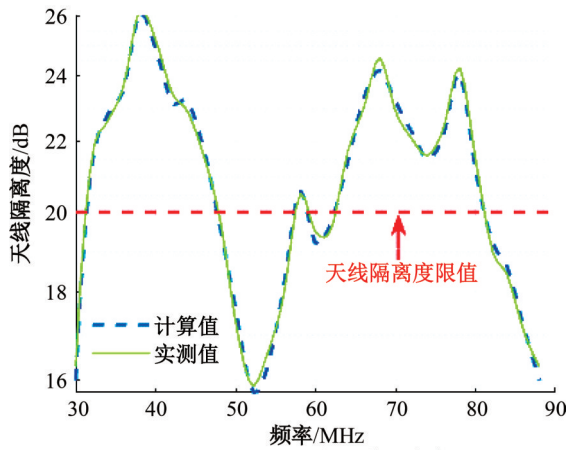


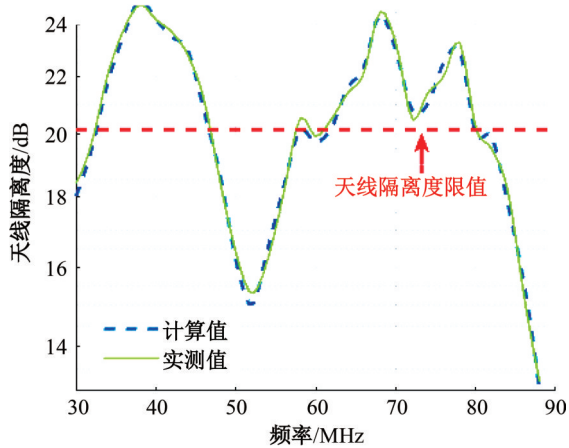
图 4 接收机 VHF3 灵敏度减小量

Fig. 4 Receiver VHF3 sensitivity decrease

算和实测结果如图 5 所示,可知, HF1 与 VHF3 的天线隔离度计算值与实测值基本吻合,且在 48~57 MHz 和 81~88 MHz 频段内 < 20 dB。由图 5 (b) 知, VHF2 与 VHF3 的天线隔离度计算值与实



(a) HF1 和 VHF3 间天线隔离度



(b) VHF2 和 VHF3 间天线隔离度

图 5 天线隔离度实测值和计算值对比

Fig. 5 Comparison of measurement and calculation of antenna isolation

测值基本吻合,且在 47~58 MHz 和 80~88 MHz 频段内 < 20 dB。根据系统 EMC 指标要求,天线隔离度需 > 20 dB,故本级评估结果 $IM > 0$,需要进行第五级评估。

2.5 五级评估:通信性能评估

2.5.1 通信距离评估

车辆通信距离下降程度与车载接收机 VHF3 灵敏度减小量关系如图 6 所示,可知当接收机灵敏度减小 6 dB 时,通信距离下降 50%。

2.5.2 通信质量评估

不同类型数字信号的误码率限值不同,如表 7 所示。两辆装甲车辆进行音频信号传输,故音频信号的最大误码率限值为本级评估标准。图 7 给出了在 Matlab Simulink 中建立的系统链路仿真模型,仿真结果如图 8 所示。

图 8(a) 和 (b) 分别表示不同调制方式下和不同信道编码模式下接收到的音频信号误码率与信噪比的关系,红色虚线是可区分音频信号的最大误码率限值。由图 8 可知,在装甲车辆通信系统中,采用 2PSK 相干解调方式和卷积编码模式会使系统具备较优的 EMC。由于接收到的音频信号误码率高于系统限值,故 $IM > 0$ 。

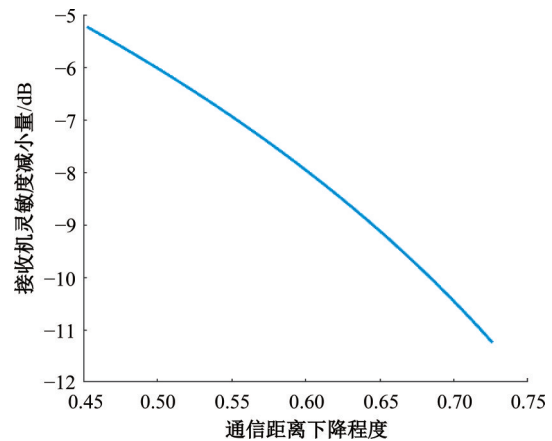


图 6 接收机 VHF3 灵敏度减小量和通信距离下降的关系

Fig. 6 Relationship between the receiver VHF3 sensitivity decrease and the communication distance decrease

表 7 各类型数字信号误码率限值

Table 7 BER threshold for each type of digital signal

信号类型	误码率限值要求
音频	$P_e \leq 10^{-3}$
图像	$P_e \leq 10^{-5}$
视频	$P_e \leq 10^{-6}$

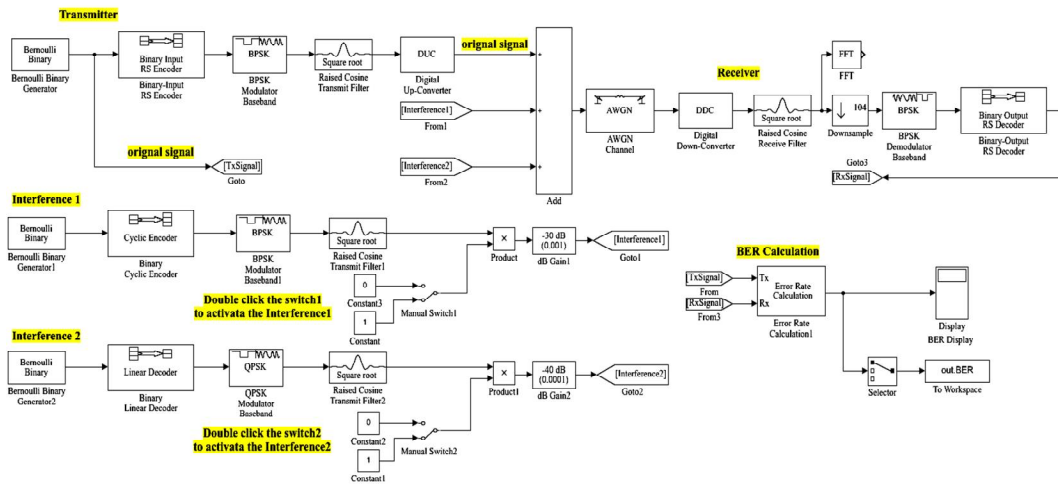
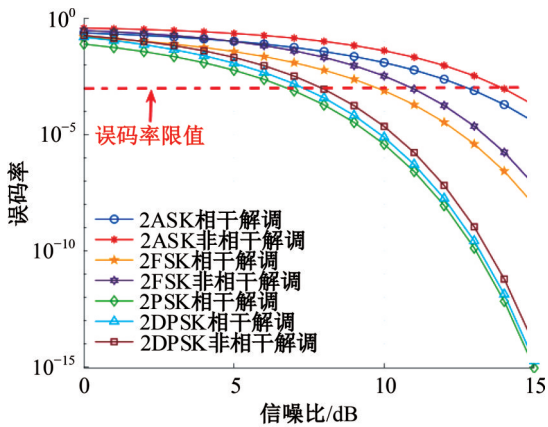
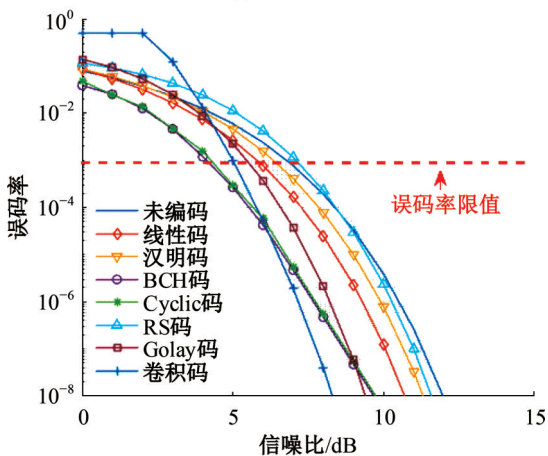


图 7 通信链路仿真模型

Fig. 7 Simulation model of the communication link



(a)不同调制方式



(b)不同编码模式

图 8 误码率与信噪比的关系

Fig. 8 Relationship between BER and SNR

综上,所有评估流程已完成。根据评估结果可知,该装甲车辆车载通信系统中存在潜在的EMI,可能出现电磁不兼容的风险。

3 结束语

本文针对装甲车辆通信系统 EMC 问题,构建了一种新型车载通信系统 EMC 评估模型。该模型从工作环境、信号频谱、接收机灵敏度、天线隔离度和通信性能 5 个方面对装甲车辆车载通信系统的 EMC 进行评估分析。通过使用该模型对某装甲车辆车载通信系统进行评估来验证其性能,结果表明了该模型的正确性,且适用于装甲车辆车载通信系统 EMC 的评估。

参考文献:

[1] Wang K B, Lu H M, Chen C C, et al. Modeling of system-level conducted EMI of the high-voltage electric drive system in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64 (3): 741-749.

[2] Wang K B, Lu H M, Li X J, et al. High-frequency modeling of the high-voltage electric drive system for conducted EMI simulation in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2808-2819.

[3] Qian W W, Yang Y L, Peng J H, et al. EMI modeling for vehicle body using characteristic mode analysis [C]//2022 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Beijing, China, 2022: 732-734.

[4] 赵晓凡. 新能源车高压电驱动系统电磁兼容关键技术[J]. 安全与电磁兼容, 2018(5): 9-10. Zhao Xiao-fan. Key EMC technologies for high-voltage electrical drive system of new energy vehicle[J].

- Safety & EMC, 2018(5): 9-10.
- [5] Konstantinos P. Research on EMI from modern electric vehicles and their recharging systems[C]//2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Rome, Italy, 2020: 1-6.
- [6] GJB 8848-2016 系统电磁环境效应试验方法[S].
- [7] Alain A. EMC performances of a land army vehicle to respect integrated radios reception sensitivity: typical performances needed for "fitted for radio (ffr)" land vehicle[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Los Angeles, USA, 2018: 303-308.
- [8] Zhao T, Liu X M, Sun P, et al. EMC vehicle-level layout design for railway vehicles in complex electromagnetic environment[C]//11th International Conference on Information Technology in Medicine and Education, Wuyishan, China, 2021: 231-236.
- [9] 赵晓凡. 基于功能安全的电磁兼容及防护技术[J]. 微波学报, 2018, 34(增刊2): 406-409.
Zhao Xiao-fan. Electromagnetic compatibility and protection technology based on functional safety[J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(Sup. 2): 406-409.
- [10] Zhang P C, Sun Y T, Leung H, et al. A novel approach for qos prediction based on bayesian combinational model[J]. China Communications, 2016, 13(11): 269-280.
- [11] Marc P, Marco A, Ferran S. Measurement and evaluation techniques to estimate the degradation produced by the radiated transients interference to the GSM system[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(6): 1382-1390.
- [12] 张世巍,赵晓凡. 军用车辆外部射频干扰试验测试技术研究[J]. 宇航计测技术, 2016, 36(1): 7-13.
Zhang Shi-wei, Zhao Xiao-fan. Research of external rf immunity test technique for military vehicles[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2016, 36(1): 7-13.
- [13] 赵家升, 杨显清, 杨德强. 电磁兼容原理与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [14] Zhou P, Lv Y H, Chen Z H, et al. System-level EMC assessment for military vehicular communication systems based on a modified four-level assessment model[J]. China Communications, 2018, 15(8): 39-53.
- [15] 李修和. 战场电磁环境建模与仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [16] 路宏敏, 余志勇, 李万玉. 工程电磁兼容[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2019.
- [17] 武南开, 苏东林, 何洪涛, 等. 机载超短波电台邻道干扰减敏特性建模与评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(3): 481-487.
Wu Nan-kai, Su Dong-lin, He Hong-tao, et al. Modeling and evaluation of adjacent channel interference desensitization characteristics of airborne ultra-short wave radio [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(3): 481-487.
- [18] ITU-R P. The concept of transmission loss for radio links: 341-7[Z]. Geneva: International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector, 2019.
- [19] Malmstrom J, Frid H, Jonsson B L G, et al. Approximate methods to determine the isolation between antennas on vehicles[C]//2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Okinawa, Japan, 2016: 131-132.
- [20] 张光硕. 装甲车车载天线系统电磁兼容分析[D]. 西安:西安电子科技大学电子工程学院, 2015.
Zhang Guang-shuo. Electromagnetic compatibility analysis of vehicle antenna system of armored vehicle [D]. Xi'an: School of Electronic Engineering, Xidian University, 2015.
- [21] GJB 3621—99 军用无线电台车通用规范[S].
- [22] GJB 2763—96 通信设备语音质量与等级标准与评测方法[S].