

技术专论

战场电磁兼容预测中的干扰发射机模型研究

徐英, 李修和

(电子工程学院, 合肥 230037)

摘要: **目的** 建立战场电磁兼容预测中的电磁干扰发射机数学模型。**方法** 分析电磁干扰发射机模型的组成和发射原理, 建立基波、谐波、非谐波和互调发射的幅度和频谱(功率谱)模型, 并探讨模型中的参数获取方法。**结果** 给出了较为完备的发射机模型, 基波调制包络模型分段折线拟合方法, 和模型相关参数的测量方法。**结论** 利用上述数学模型, 可以进行战场电磁干扰源(发射机)的建模, 为战场电磁兼容预测分析与仿真奠定基础。

关键词: 电磁兼容; 发射机; 模型; 预测

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.03.014

中图分类号: TN83 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)03-0065-06

Study on Transmitter Modelling in Forecast Simulation of Electromagnetic Compatibility

XU Ying, LI Xiu-he

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the mathematical model of electromagnetic interference transmitter in electromagnetic compatibility analysis. **Methods** The composition and emission principle of electromagnetic interference transmitter were analyzed. The power models and frequency models of fundamental wave, harmonic wave, anharmonic wave and inter-modulation wave radiate from transmitter were studied, and the getparms method of correlative parameters was investigated. **Results** The relatively complete models, the methods of piecewise linear approximation of modulation envelope and the measure methods of correlative parameters were presented. **Conclusion** The result of transmitter modeling could provide reference for electromagnetic compatibility predictive analysis and simulation.

KEY WORDS: electromagnetic compatibility; transmitter; model; predictive analysis

收稿日期: 2014-02-07; 修订日期: 2014-03-20

Received: 2014-02-07; Revised: 2014-03-20

基金项目: 重点预研基金项目(9140A33020112JB39085)

Fund: Supported by Major Project of the Weapon and Equipment Pre-Research Foundation (9140A33020112JB39085)

作者简介: 徐英(1979—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为战场电磁兼容。

Biography: XU Ying(1979—), Female, Ph. D., Lecturer, Research focus: battlefield electromagnetic compatibility.

建立电磁兼容三要素数学模型是基于电磁干扰方程^[1]进行电磁兼容预测^[2-3]的关键,其首要步骤就是建立电磁干扰辐射源模型。战场电磁兼容属于系统间电磁兼容,因此可以把干扰发射机作为电磁环境的一个元素来描述,不需要具体研究它的内部构造,只需确定其发射能量的幅度和频率分布,并建立相应模型。

国外很多学者把发射机模型分为基波发射模型和寄生发射模型。1986 年, Gill^[4]以调频发射为例,介绍了基波发射调制包络模型。1991 年, Terry Foreman^[5]介绍了 Mason-Zimmerman 模型和修正的磁控管模型。1995 年,一些学者把发射机模型分为离散模式和频带模式^[6],包括基本辐射、非基本辐射和寄生辐射等类型。1996 年,文献[7]把干扰发射机模型分为时域模型和频域模型,并把上述发射机模型类型名称分别改为基波发射、谐波发射和非谐波(杂散)发射。1999 年,文献[8]在不同的等级上对发射机模型进行了描述,随着预测筛选等级的递增,发射机模型描述也越来越精确详细。2010 年^[9]和 2011 年^[10],何新亮等对谐波带宽模型进行了实验和理论分析,明确了谐波和基波的带宽关系。

本文分别建立了基波、谐波、非谐波和互调发射的幅度和频谱模型,对基波调制包络模型分段折线拟合方法进行探讨,并分析发射机相关参数的测量方法,为建立实用的战场电磁兼容预测系统的发射机模型提供依据。

1 发射机模型

发射机通过天线将携有信息的频率(段)进行功率辐射,除了辐射所需要的频率外,通常还产生若干杂散频率上的发射,这些辐射都可能会在接收机中产生电磁干扰。发射机的发射主要包括:基波发射、谐波发射、非谐波发射、互调干扰和宽带噪声辐射等。由于宽带噪声电平相当低,通常可以不予考虑,对于大功率干扰发射机,可通过将其噪声辐射的平均功率加到基波功率上进行描述。下面具体分析其他 4 种发射模型。

1.1 基波发射模型

基波发射模型包括基波信号幅度模型和基带频谱模型两部分。

1) 基波发射幅度模型。发射机的基波发射功率一般服从正态分布。当可以获得发射机测量数据时,功率分布可用多次测量数据的平均值及标准偏差表示^[11];当没有现成的测量数据时,可用发射机的额定功率作为基波功率平均值,标准偏差取为 2 dB。

2) 基带发射频谱模型。发射机基波的实际输出往往不是单一频率,而是近似对称分布在基频附近的频段内。发射机功率的大部分在标称带宽(即 3 dB 带宽)内,此区外的功率随频率间隔增大而迅速减小。发射机的标称带宽一般由其规格说明书给定。当没有具体数据时,发射机标称带宽可由发射参数和调制特性确定。

发射机频谱(或功率谱)模型用于近似表示干扰源辐射频谱(或功率谱),特别是不可能得到测量数据的情况,可由基带调制包络函数来表示。对于简单信号,可以采用 Mason-Zimmerman 频谱模型^[5]。还可以采用分段折线拟合法,用分段线性函数近似描述调制包络模型,表示为:

$$M(\Delta f) = M(\Delta f_i) + M_i \lg\left(\frac{\Delta f}{\Delta f_i}\right) \quad (i=1, 2, \dots) \quad (1)$$

式中: $\Delta f = |f - f_{\text{or}}|$ 为实际频率与基带中心频率之间的差值, $\Delta f_i \leq \Delta f \leq \Delta f_{i+1}$; $M(\Delta f)$ 是与中心频率间隔 Δf 处的功率电平, dB; Δf_i 是第 i 段折线起点对应的频率与中心频率的差值; $M(\Delta f_i)$ 是 Δf_i 上的辐射功率相对于 0 dB 的下降值; M_i 是第 i 段折线的斜率(即调制包络斜率), $M_0 = 0$, 当有具体发射机测量数据时, $M_i (i=1, 2, \dots)$ 可由统计数据得到, 由下式决定:

$$M_i = [M(\Delta f_{i+1}) - M(\Delta f_i)] / [\lg(\Delta f_{i+1}) - \lg(\Delta f_i)] \quad (2)$$

计算时,各 Δf_i 的取值取决于近似要求的准确度,可以取各折线段的起止频率变化一个倍频程,也可以取各折线端点对应 3, 6, 10, 20, 40, 60, 80, 100 dB 等带宽位置。以线性调频信号为例,设采样频率 f_s 为 100 MHz,起始频率 $f_c = 8$ MHz,调频带宽 B_T 等于 4 MHz,实际包络曲线和考虑 3, 6, 10, 20, 40, 60 dB 等带宽处的相对功率建立的分段折线拟合如图 1 所示,对应的各折线段斜率常数见表 1。实际包络曲线和考虑各折线段起止点频率变化一个倍频程建立的分段折线拟合如图 2 所示,对应的各折线段斜率常数见表 2。

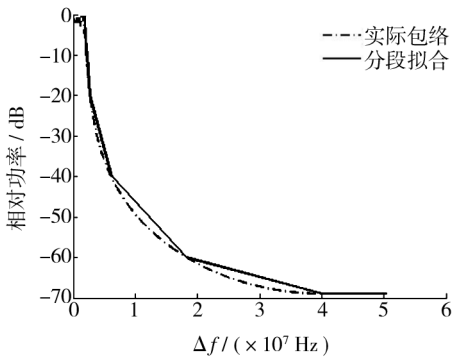


图 1 考虑 xdB 带宽建立的调制包络分段折线拟合
Fig.1 Piecewise linear approximation of modulation envelope considering xdB band

表 1 考虑 xdB 带宽建立的调制包络折线斜率常数
Table 1 Slope constant of piecewise linear modulation envelope model considering xdB band

i	$\Delta f_i/\text{MHz}$	$M(\Delta f_i)/\text{dB}$	M_i
1	1.8	0	-131.1
2	2.0	-6	-96.6
3	2.2	-10	-112.4
4	2.7	-20	-55.4
5	6.2	-40	-42.5
6	18.3	-60	-26.3
7	40	-68.9	0

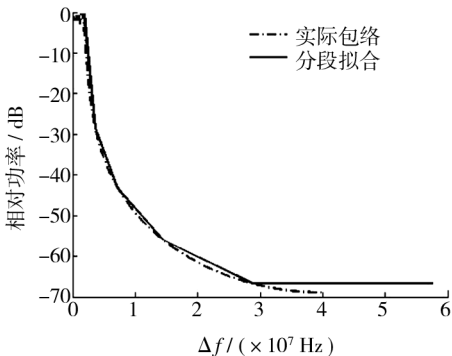


图 2 考虑倍频程建立的调制包络分段折线拟合
Fig.2 Piecewise linear approximation of modulation envelope considering octave

为了便于计算,在没有现成的发射机调制包络具体数据时,对于工作模式比较简单的发射机可以采用通用表达式来描述电磁干扰预测所用的发射机调制特性^[7,12]。对于工作模式较为复杂的情况,随

表 2 考虑倍频程建立的调制包络折线斜率常数
Table 2 Slope constant of piecewise linear modulation envelope model considering octave

i	$\Delta f_i/\text{MHz}$	$M(\Delta f_i)/\text{dB}$	M_i
1	1.8	0	-94.7
2	3.6	-28.5	-48.9
3	7.2	-43.2	-42.3
4	14.4	-55.9	-35.8
5	28.8	-66.7	0

着工作频率的偏移,信号幅度并不是单调递减,此时只能由发射机和信号参数(如调制参数、载波频率、发射功率和放大器特性等)建立更精细的频谱(或功率谱)模型。

1.2 谐波发射模型

1)谐波发射幅度模型。基波发射通常会伴随谐波发射,谐波发射频率是基波发射输出频率的整数倍。谐波发射通常是带外辐射中功率最高的,发射平均功率随谐波次数增加而减少,且幅度一般也服从正态分布。谐波辐射的平均功率可表示为^[13]:

$$\overline{P}_T(Nf_{0T}) = \overline{P}_T(f_{0T}) + A \lg N + B \quad (N \geq 2) \quad (3)$$

式中: N 为谐波次数; $\overline{P}_T(Nf_{0T})$ 为 N 次谐波平均功率; f_{0T} 为基波频率; $\overline{P}_T(f_{0T})$ 为基波平均功率;常数 A 为斜率;常数 B 为相应于基波的幅度最高点。 A, B 可由不同发射机测量数据综合得出。

2)谐波发射频谱模型。发射机射频功率放大器的波形失真是产生谐波的主要原因,其中以基波的谐波为主,与非基波频率有谐波关系的输出通常可忽略。理论分析和大量实测数据表明,谐波和基波的调制包络形状相似,幅度上比基波低很多,带宽相等或成整数倍关系^[9-10]。因此,仍可用通用模型建立谐波调制包络模型,并根据信号调制方式在带宽上进行相应的线性拉伸,还可以采用实测频谱对模型进行修正。

仍以线性调频为例,根据文献[10]的分析和文献[1]的实验结论,线性调频的谐波带宽是基波的整数倍,通过对基波调制包络模型进行线性拉伸可以得到二次、三次等谐波的调制包络模型,如图 3 和图 4 所示。高次谐波边带的电平非常小,实际中会

淹没在宽带噪声电平中。

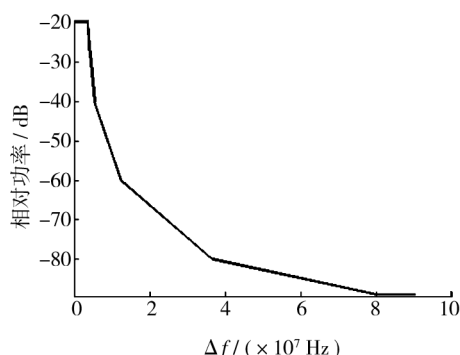


图3 二次谐波的调制包络模型

Fig. 3 Modulation envelope model of second harmonic wave

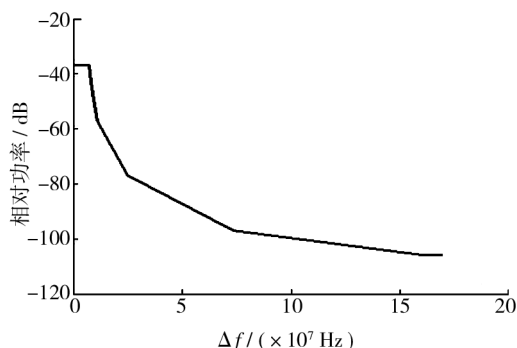


图4 三次谐波的调制包络模型

Fig. 4 Modulation envelope model of third harmonic wave

1.3 非谐波发射模型

1) 非谐波发射幅度模型。发射机非谐波发射主要是指除谐波以外的其他带外杂散发射,取决于具体的发射机,其幅度通常低于谐波发射幅度。在低于基频的频段上,由于谐波不可能出现在该频段内,因此非谐波发射的影响较为明显,可能会引起较为严重的干扰,其幅度模型可以表示为^[11]:

$$\bar{P}_T(f) = \bar{P}_T(f_{OT}) + A' \lg |f + f_{OT}| + B' \quad (4)$$

式中: f 为非谐波发射信号频率; $\bar{P}_T(f)$ 为非谐波发射平均功率;常数 A' 和 B' 与发射机有关,可由发射机说明书估计,或由现成统计数据拟合得到。

2) 非谐波发射频谱模型。非谐波发射难以在频率上精确建模,所以通常采用实测值。当没有非谐波发射实测值时,可根据发射机工作体制和本振等参数估计其频率,通常用一定频率区间内出现的概率来描述^[6]:

$$p = H \frac{B_R}{f_{OT}} \quad (5)$$

式中: B_R 为所考虑的(接收机)频带宽度; H 为与发射机种类有关的常数,描述整个频段上的统计特性。

1.4 发射机互调和交调模型

发射机互调干扰是指发射信号与由天线馈入的其他信道信号在发射机功放电路中相互调制,而产生新的频率组合,随同有用信号一起发射出去,其中较为严重的是三阶互调^[14]。发射机交调干扰则是指由于发射机的非线性,导致其他频道的调制信号对有用信号进行了转移调制,从而产生干扰信号。

互调信号频率可由下式确定:

$$f_{pq} = pf_n + qf_i \quad (6)$$

式中: p, q 为正整数; f_{pq} 为输出信号的频率; f_n 和 f_i 分别为其他频道的信号和有用信号。

如果发射机互调产生的新频率恰好落入接收机工作频段内,将可能对接收机产生干扰。多数情况下,发射机互调的影响相对接收机互调要小得多,可以忽略。互调干扰可由发射机功率放大器的“载波可调比”参数(IM)来定量描述^[15]:

$$IM = 20 \lg \frac{\text{载波电压}}{\text{互调产物电压}} \quad (7)$$

同理,交调干扰可由“交调比”参数(CM)来描述^[15]:

$$CM = 20 \lg \frac{\text{需要的调制电压}}{\text{其它频道转移来的调制电压}} \quad (8)$$

2 发射机相关参数的测量

当条件许可,能够对实际装备进行指标测试时,可以通过对发射机的输出功率、信号样式和带宽、谐波和非谐波等参数的测量,获取干扰辐射源的相关参数,使模型更加精确。

2.1 发射机功率测量

测试仪器:大功率衰减器1台,功率计1台。测试框图如图4所示。

测试步骤如下:

- 1) 按图5所示连接仪器和被测设备;
- 2) 按要求设置工作频率,同时在功率计上置入

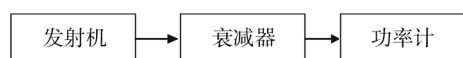


图 5 发射机功率测试框图

Fig. 5 Scheme of transmitter power test

相应频率的衰减值;

3) 控制发射机发射相应频率的信号,从功率计上读出该频率点的功率值并记录;

4) 改变工作频率,重复步骤 2)、3),测试出全部待测频率点的功率值。

当有多部相同型号的发射机时,可以用多次实际测量的平均值及标准偏差来表示该型号发射机功率分布的幅度模型。

2.2 频谱、中心频率和带宽测量

测试仪器:频谱仪 1 台。

测试步骤:

- 1) 连接仪器和被测设备;
- 2) 根据发射机性能,设置工作频率和带宽;
- 3) 采集发射机输出信号的频谱,读出信号的中心频率和带宽并记录。

信号中心频率和 x dB 带宽的读取方法如下:

- 1) 读取信号最大电平,并将其设为零电平;
- 2) 读出信号频谱两侧低于零电平 x dB 处的频率 f_1, f_2 ;
- 3) 计算信号中心频率 $f_0 = (f_1 + f_2) / 2$ 及对应的 x dB 带宽 $B_x = |f_1 - f_2|$ 。

2.3 谐波、非谐波测量

测试仪器:大功率衰减器 1 台,频谱仪 1 台。测试框图如图 6 所示。

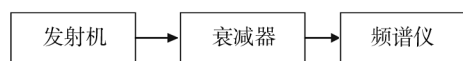


图 6 谐波、非谐波测试框图

Fig. 6 Scheme of harmonic wave and anharmonic wave test

测试步骤:

- 1) 按图 6 所示连接仪器和被测设备;
- 2) 设置工作频率,带宽 0 Hz;
- 3) 从频谱仪上读出发射机输出的基波与二次、三次谐波电平、非谐波(杂波)电平并记录^[16];

4) 改变工作频率,重复步骤 2)、3),完成全部选定频率点的测试。

3 结语

建立描述发射机发射频谱及功率特性的电磁干扰辐射源模型是进行战场电磁兼容预测的基础。本文分析了发射机基波、谐波、非谐波、互调等发射的幅度和频谱模型,研究了基波调制包络模型的分段折线拟合法,并探讨了相关的发射机参数测量方法。据此可以进行战场电磁干扰源(发射机)的建模,为战场电磁兼容预测分析与仿真奠定基础^[17]。

参考文献:

- [1] 何新亮,赵兴录,盛松林,等. 电磁兼容预测中雷达发射机模型研究[J]. 现代雷达,2010,32(12):83—87.
HE Xin-liang, ZHAO Xing-lu, SHENG Song-lin, et al. A Study on Radar Transmitter Models for EMC Prediction [J]. Modern Radar, 2010, 32(12): 83—87.
- [2] 徐扬,谭辉,方重华,等. 系统 EMI 预测分级筛选方法研究[J]. 装备环境工程,2009,6(5):39—41.
XU Yang, TAN Hui, FANG Chong-hua, et al. Research on Classified Filtration Method for EMI Prediction of System [J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(5): 39—41.
- [3] 肖卫东,潘涵. 国外电磁兼容仿真软件发展概述[J]. 装备环境工程,2010,7(2):55—60.
XIAO Wei-dong, PAN Han. Development of Simulation Software of Electromagnetic Compatibility Overseas [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(2): 55—60.
- [4] GILL P S. Use of Synthesized System Models and Frequency Distance Criteria for a Parameter Sensitive Interference Prediction Model Developed for Tactical Radio Environment[C]//IEEE 1986 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. San Diego, California, 1986.
- [5] FOREMAN T. A Radar-to-radar Interference Prediction Model[C]//IEEE 1991 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Cherry Hill, NJ, 1991:200-205.
- [6] 王定华,赵家升. 电磁兼容原理与设计[M]. 成都:电子科技大学出版社,1995.
WANG Ding-hua, ZHAO Jia-sheng. Theory and Design of EMC[M]. Chengdu: UEST Press, 1995.

- [7] 湖北省电磁兼容学会. 电磁兼容性原理与应用[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
EMC Institute of Hubei Province. Theory and Application of EMC[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996.
- [8] 王庆斌,刘萍,尤利文,等. 电磁干扰与电磁兼容技术[M]. 大连:大连海事出版社,1999.
WANG Qing-bin, LIU Ping, YOU Li-wen, et al. EMI and EMC[M]. Dalian: Dalian Maritime Affair Press, 1999.
- [9] 赵兴录,何新亮,盛松林,等. 雷达发射机辐射发射测试研究[J]. 雷达与对抗,2010,30(3):51—55.
ZHAO Xing-lu, HE Xin-liang, SHENG Song-lin, et al. The Test of Radiation Transmission of Radar Transmitters[J]. Radar & ECM, 2010, 30(3): 51—55.
- [10] 何新亮,盛松林. 雷达发射机信号谐波带宽模型分析[J]. 信息与电子工程,2011,9(4):409—412.
HE Xin-liang, SHENG Song-lin. Analysis on Harmonic Wave Bandwidth Models of Radar Transmitter Signals[J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(4): 409—412.
- [11] 王海波. 系统间电磁兼容性预测分析软件的开发与研究[D]. 成都:电子科技大学,2008.
WANG Hai-bo. Research and Development of Intersystem Electromagnetic Compatibility Prediction and Analysis[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2008.
- [12] 贾传钊. 通信系统间电磁兼容性预测分析技术[D]. 成都:电子科技大学,2009.
JIA Chuan-zhao. Intersystem Electromagnetic Compatibility Prediction and Analysis Technique about Communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2009.
- [13] 陈鸿. 系统间电磁兼容性预测分析与仿真[D]. 成都:电子科技大学,2006.
CHEN Hong. Analysis and Simulation of Intersystem Electromagnetic Compatibility Prediction[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2006.
- [14] 郭占涛. 移动通信系统中三阶互调干扰的研究和分析[J]. 移动通信,2011,35(24):51—55.
GUO Zhan-tao. Analysis and Study on Third-order Intermodulation in Mobile Communication Systems[J]. Mobile Communications, 2011, 35(24): 51—55.
- [15] 李育林. 分析“交调”与“互调”干扰产生的原因及其抑制方法[J]. 黄冈师范学院学报,1999,19(6):14—17.
LI Yu-lin. Analysis on The Origin and Suppression Method of Intermodulation and Cross Modulation[J]. Journal of Huanggang Normal University, 1999, 19(6): 14—17.
- [16] 何新亮,盛松林,刘列,等. 频谱仪测量发射机带外杂散信号的分析[J]. 无线电工程,2010,40(11):30—32.
HE Xin-liang, SHENG Song-lin, LIU Lie, et al. Analysis on Testing Spurious Signals of Transmitters by Spectrum Analyzer[J]. Radio Engineering, 2010, 40(11): 30—32.
- [17] 郭艳辉,李子森. 武器装备电磁兼容性预测试技术初探[J]. 装备环境工程,2008,5(1):88—91.
GUO Yan-hui, LI Zi-sen. Discussion on Weaponry EMC Pretest Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(1): 88—91.

(上接第 60 页)

- WANG Gao-yuan, LI Guo-qiang. The Requirements of Construction Machinery on the Plateau[J]. Construction Machinery & Maintenance, 2003, (7): 103—104.
- [19] 许翔,周广猛,郑智,等. 高原环境对保障装备的影响及适应性研究[J]. 装备环境工程,2010,7(5):100—103.
XU Xiang, ZHOU Guang-meng, ZHENG Zhi, et al. Research on Influence of Plateau Environment on Support Equipment and Its Environmental Worthiness[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 100—103.
- [20] 廖清德. XGL50 高原装卸机的高原环境适应性研究[J]. 中国工程机械学报,2004,2(2):231—232.
LIAO Qing-de. Study of XGL50 Highland Loader Acclimated to the Plateau[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2004, 2(2): 231—232.