

文章编号: 1672-2892(2012)04-0426-05

基于信号分析的通信对抗干扰效果评估方法

王满喜^{1,2}, 聂 嵘², 黎 力², 谈东兰²

(1.中国人民解放军 63880 部队 博士后工作站, 河南 洛阳 471003; 2.中国人民解放军 63880 部队, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 通信对抗仿真试验需要实时的干扰效果评估算法来满足动态试验过程的研究分析和试验效果的实时显示。提出了一种基于信号分析的通信对抗干扰效果评估方法, 该方法将目标信号在复杂电磁环境中的信号特征参数识别误差, 作为目标信号受干扰程度的评判参考, 具有实时性好的突出特点, 评估实例证明了该方法在一定信噪比区间内的有效性。

关键词: 信号分析; 通信对抗; 干扰效果评估; 建模仿真

中图分类号: TN911.4

文献标识码: A

Jamming effect assessment method by signal analysis in communication-counterwork

WANG Man-xi^{1,2}, NIE Hao², LI Li², TAN Dong-lan²

(1.Postdoctoral research workstation, the 63880 Unit of PLA, Luoyang Henan 471003, China;

2.The 63880 Unit of PLA, Henan Luoyang 471003, China)

Abstract: Real-time jamming effect assessment is required by the analysis on test process and live display of dynamic communication countermeasure simulation test. This paper proposes a new jamming effect assessment method based on signal analysis. In this method, the signal characteristics recognition error of the target signal in complex electromagnetic environment is taken as the referenced judgment of jamming effect. The proposed method shows good performance of real-time and is proved effective in certain sections of SNR via an illustration.

Key words: signal analysis; communication countermeasure; jamming effect assessment; modeling and simulation

干扰效果是检验通信对抗装备的一个重要指标。在通信对抗仿真试验中, 不仅需要对某一固定状态下的通信对抗干扰效果进行评估, 还需要对处于运动状态和复杂电磁环境下的接收机的受干扰程度进行实时评估, 以便于试验过程的研究分析和试验效果的实时显示。由于实时干扰效果评估对评估算法的实时性要求较高, 传统的基于长时间误码统计的、以通信终端接收误码率为评判依据的通信对抗干扰效果评估方法已不能满足仿真试验的需求, 故必须研究或开创新的干扰效果评估方法。本文针对实际应用需求, 提出了一种基于信号分析的通信对抗干扰效果评估方法, 该方法不以接收机输出作为分析对象, 而是将目标信号在复杂电磁环境中的信号特征参数识别误差, 作为目标信号受干扰程度的评判参考, 具有实时性好的突出特点, 非常适合作为在复杂电磁环境下干扰效果实时评估和显示的后台处理算法。

1 基于信号分析的通信对抗干扰效果评估方法的基本思路

在通信对抗试验中, 通常以误码率作为通信接收机受干扰程度的判别标准, 同时, 为了得到干扰装备对通信接收机的压制系数, 或者通信接收机的抗干扰容限, 需要给出在误码率高达一定程度时的干信比(Jamming to Signal Ratio, JSR), 即需要知道误码率和干信比之间的对应关系, 从而可以有针对性地分析该样式的干扰信号对通信信号的干扰性能。

对给定调制样式的基带通信信号, 其接收误码率主要受 4 个因素的影响: 接收信噪比(或干信比)、干扰信号样式、解调方式和实现电路带来的信噪比损耗。当接收机具体给定时, 解调方式和实现电路带来的信噪比损耗相

对恒定, 干信比和干扰信号样式是引起误码率变化的主要因素。在存在多种干扰信号和背景信号的复杂电磁环境中, 通常会有多路干扰信号、背景信号、一路甚至多路通信信号同时进入通信接收机, 而且非目标信号(干扰信号、背景信号和其他通信信号)的调制样式种类复杂多样, 信号功率也动态变化, 此时想通过一组干信比—误码率函数曲线作为接收机性能的评价标准是不可能的。即使根据不同的非目标信号样式, 得到了多组干信比—误码率函数曲线, 也不能直接得到接收机误码率, 因为非目标信号之间存在相互作用, 而且它们对目标信号的影响也并非简单叠加。

基于信号分析的通信对抗干扰效果评估方法, 正是为了解决上述问题而提出的。该评估方法不以干信比和误码率的对应关系作为分析对象, 而是将目标信号在复杂电磁环境中的信号特征参数识别误差作为目标信号受干扰程度的评判参考。基于信号分析的通信对抗干扰效果评估方法的基本原理如图1所示。

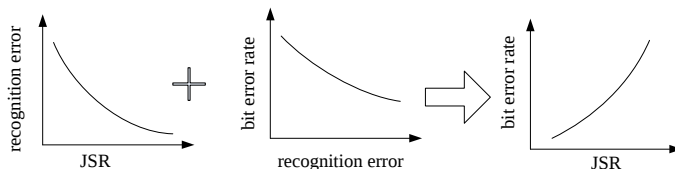


Fig.1 Sketch of the principle of the proposed jamming effect assessment method
图1 基于信号分析的干扰效果评估方法原理

识别误差是通信对抗侦察系统的一个重要指标, 它描述的是侦察接收机对目标信号的频率、信息速率、码速率等特征参数的测量准确率。识别误差和接收干信比紧密相关, 侦察接收机总有一个干信比—识别误差曲线, 以表征侦察系统的侦察能力。如果用 X 表示当前复杂电磁环境的信号样式、功率、干信比等状态, 那么当侦察系统的侦察接收机(包括识别算法)一定时, 识别误差可用函数 $P_d = f_d(X)$ 来表示, 同时可得其反函数为:

$$X = f_d^{-1}(P_d) \quad (1)$$

此时如果用通信接收机来接收目标信号, 则接收机的误码率可用函数 $P_b = f_b(X)$ 表示, 将式(1)代入, 有:

$$P_b = f_b[f_d^{-1}(P_d)] = F(P_d) \quad (2)$$

式中 $F(\cdot)$ 表示识别误差 P_d 和误码率 P_b 之间的函数关系。可以看出, 如果能够建立 $F(\cdot)$ 函数表达方法, 比如数学关系式或对应关系查找表等, 则可以避开复杂电磁环境的状态描述和分析的难题, 直接找到当前状态下的接收机误码率, 从而对复杂电磁环境下的通信对抗干扰效果进行评估。

2 基于信号分析的复杂电磁环境下通信对抗试验干扰效果评估方法

对于存在多种干扰信号和背景信号等非目标信号的复杂电磁环境下的通信对抗试验, 在目标通信信号和干扰信号特征在试验前均为已知的条件下, 将单路通信信号、通信信号和多路干扰信号的合路信号分别进行数据采集, 然后送入信号处理模块进行处理和分析。

整个评估过程中以信号处理模块为核心, 在该模块中, 首先根据接收机的实际硬件配置, 对接收机天线、射频抗干扰模块、中频抗干扰模块进行模拟, 给出抗干扰增益, 以保证基带信号处理中的准确性, 如图2所示。图中, 信号特征提取模块完成在无干扰条件下对目标通信信号的特征参数提取功能, 该模块用以检验信号特征提取算法的可行性, 并向信号特征识别模块提供特征参数的参考值; 信号特征识别模块则主要完成在干扰条件下对目标通信信号的特征参数提取功能, 通过比较自己提取的特征参数和模块提供的特征参数参考值, 给出信号特征的识别误差, 该识别误差被送往评估模块, 通过经验表查找, 得到相应的误码率, 从而得到干扰效果。

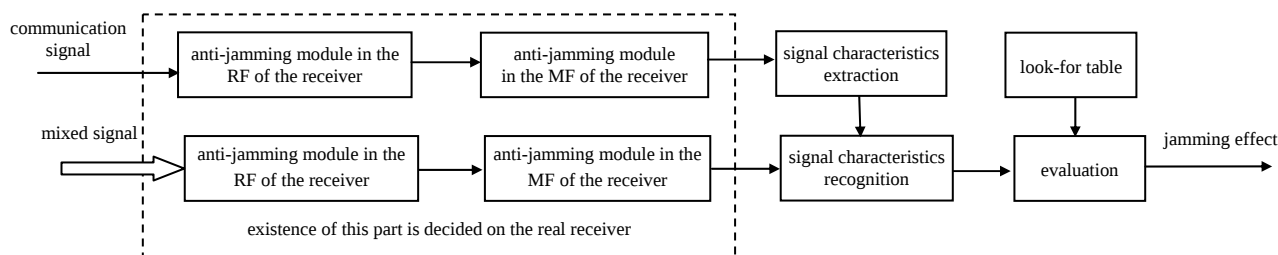


Fig.2 Signal processing and analysis on the proposed jamming effect assessment method
图2 干扰效果评估中的信号处理与分析方法

图2中的经验表在评估时起着关键作用, 对复杂电磁环境下的通信对抗试验来说, 经验表即是式(2)中 $F(\cdot)$, 即识别误差 P_d 和误码率 P_b 之间函数关系的经验对照表。该经验表可以通过图3所示的基带处理模型得到, 模型

通过信号特征识别误差来调整通信信号生成时特定参数的误差,该误差将导致解调模块误差的增加,从而影响接收系统的误码率。

3 关键技术分析

基于信号分析的通信对抗干扰效果评估,将目标信号在复杂电磁环境中的信号特征参数识别误差,作为目标信号受干扰程度的评判参考,这对评估系统的信号处理能力提出很高的要求,其关键技术主要有:

1) 射频抗干扰能力的模拟

现在越来越多的通信接收机为了提高其抗干扰性能,加装了自适应调零等智能天线,它能够为接收机带来 10 dB~30 dB 的抗干扰增益^[1-3]。对智能天线进行模拟,主要是模拟其实时可变的波束形成功能,以便实时得到其天线方向图,确定当前状态下智能天线对目标信号和干扰信号的增益和衰减。波束形成是指用一定形状的波束来通过有用信号或需要方向的信号,并抑制不需要方向的干扰。阵列天线的波束形成可以采用模拟方式,也可以采用数字方式,采用数字方式在基带实现滤波的技术称为数字波束形成。

2) 中频抗干扰能力的模拟

中频抗干扰多用于直接序列扩频通信系统中,它是对抗单音干扰和窄带干扰的有效方法^[4-5]。在基于信号分析的通信对抗干扰效果评估中,信号特征参数识别方法是算法的关键。但是,由于信号特征参数识别属于通信侦察的范畴,常用的信号特征参数识别方法都是在高斯白噪声下实现的。为了去除恶意干扰如单音、窄带等干扰对信号特征参数识别方法带来的影响,应在中频加入自适应滤波等干扰抑制能力模块,确保进入基带处理模块的干扰信号以高斯白噪声为主。

3) 信号特征参数提取和识别算法

信号特征参数提取和识别算法是基于信号分析的通信对抗干扰效果评估方法的核心和重点。严格来讲,信号特征参数识别包含了信号特征参数提取和信号调制识别等。在本文提出的干扰效果评估方法中(见图 3),信号特征参数提取模块是对无干扰的通信信号特征参数进行提取,以得到较为“真实”的、该特征提取算法得到的参数值;而信号特征识别模块是对存在干扰情况下的通信信号特征参数进行提取,它采用的是同样的特征提取算法。由于对同一信号来讲,通常有多个特征参数可供提取和识别,对不同特征参数进行提取和识别的算法也是不同的,在选择特征提取算法上,算法的鲁棒性和检测性能的单调区间是特征算法选取的重要尺度。在本文下一节的评估示例中,将以直接序列扩频信号的载波频率作为特征参数,以谱相关检测算法^[6-7]作为信号特征参数的提取算法进行仿真和验证。

4 评估示例

基于以上评估思路和方法,本文利用 Simulink 软件对常用的 DS/BPSK 通信信号的干扰效果评估进行了建模、仿真和分析。仿真中参数设置为:系统采样速率为 1 kHz,通信 PN 码采用的是长度为 31 的 m 序列,每个码片 32 个采样点,码片时宽为 32 ms;数据速率约为 1 bps;载波频率为 125 Hz,为了减少仿真时间,没有采用中频过渡;发送端成形滤波器和接收端匹配滤波器均为平方根升余弦函数;接收端采用 PN 码串行捕获、延迟锁定环和 Costas 环进行解调;没有采用信道编码,此处误码率为信道误比特率;干扰系统有 2 个干扰信号,分别是带限高斯白噪声和单音干扰,其中单音干扰中心频率和通信信号中心频率,其波达方向为 40°;带限高斯白噪声,其没有波动方向选项;通信信号的波达方向为 0°。整个仿真系统的顶层视图如图 4 所示。

接收机射频抗干扰仿真模块模拟的智能天线为 12 个阵元的均匀线阵天线,阵元间距为半个波长,通过仿真得到的主瓣方向方位角为 40°时的接收机天线方向图如图 5 所示;中频滤波在等效的基带信号处理前期进行,采用基于最小均方误差算法的误差预测滤波器;参数特征提取模块中,特征参数选取为载波频率,提取算法为谱相关算法,算法的实现过程详见参考文献[5],仿真中得到的循环自相关函数如图 6 所示;查找表通过给接收机加入载频锁定环路(Costas 环)抖动误差得到,仿真中的误差的加入电路如图 7 所示。

图 8 给出了当干扰信号源只有高斯白噪声时,仿真接收机在不同信噪比下的误码率和基于信号分析的评估算法得到的误码率的对比曲线,其中评估误码率由于在低信噪比下的载频估计误差大于 0.1 而没有计算误码率。从图中可以看到,两组误码率还是有一定差距的,两者较为接近的信噪比区间为[7~10] dB,且单调性能一致,

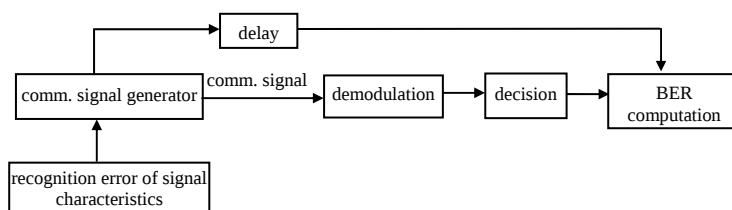


Fig.3 Baseband processing model of BER-recognition error look-for table

图3 误码率—识别误差经验表的基带处理模型

在高信噪比情况下，由于信号特征参数提取算法的 NRMSE 趋于平稳，故未能对接收机性能的变化做出评估。

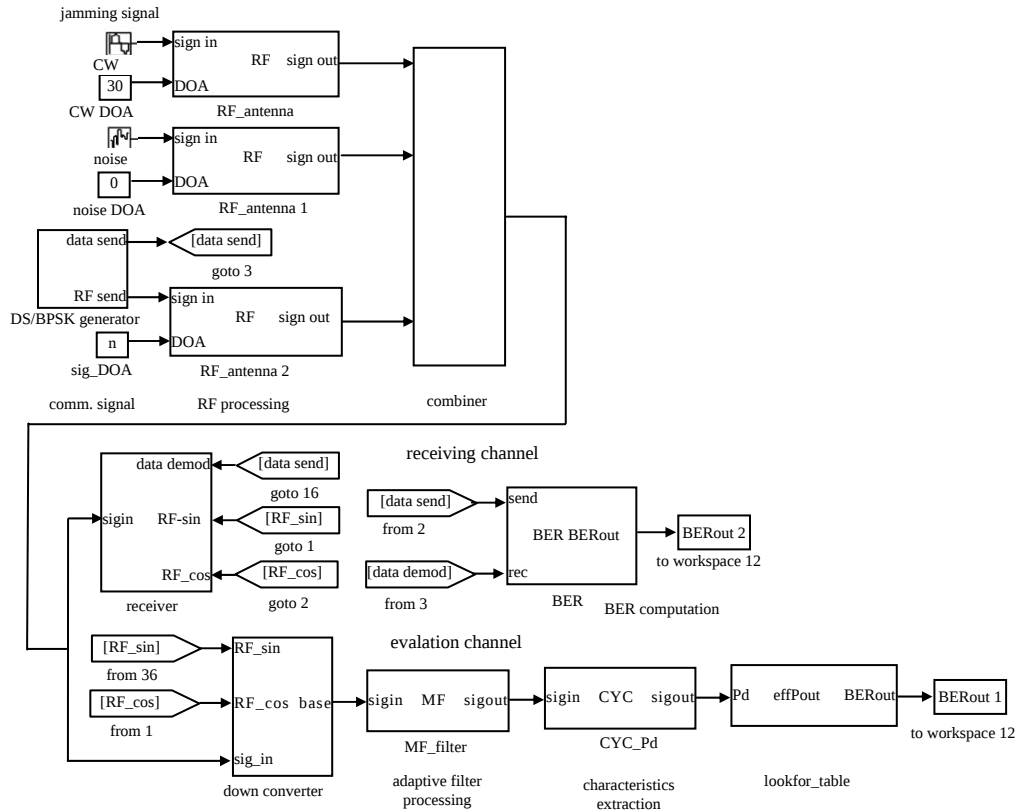


Fig.4 Top view of the simulation system

图4 仿真系统的顶层视图

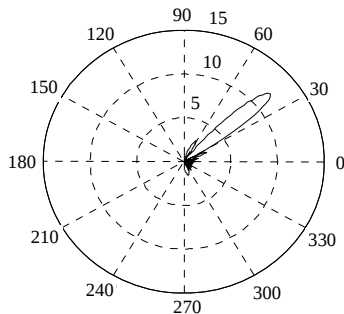


Fig.5 40° bearing beam in polar coordinates

图5 波束方向为40°的极坐标方向图

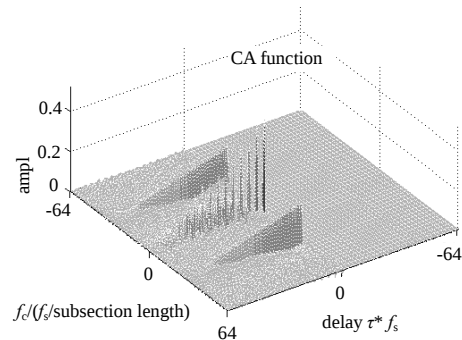


Fig.6 CA function

图6 循环自相关函数

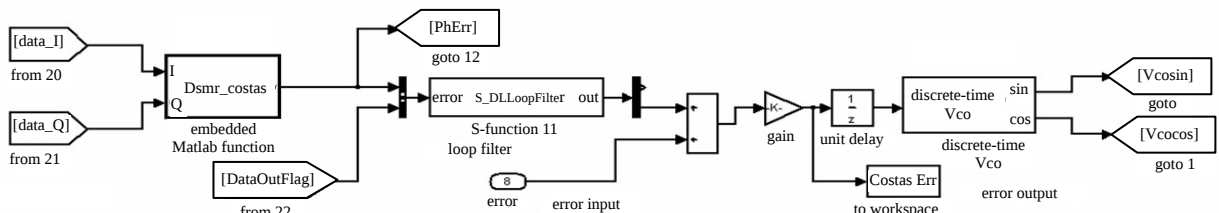


Fig.7 Error inpouring circuit in simulink

图7 Simulink 仿真中的误差加入电路

图9给出了当干扰源同时存在白噪声干扰和单音干扰时的误码性能曲线，此时白噪声干扰功率固定，与通信信号的干信比关系为-8 dB，单音干扰功率可变，图中横坐标为通信信号和单音干扰的功率比。从图中可以看出，由于评估通道加入了中频滤波模块，所以单音干扰对评估算法的影响不大；在通信信号和单音干扰的功率比小于

-4 dB 时, 由于中频滤波模块对单音的抑制能力变弱, 且由于单音干扰与通信信号同频, 故导致信号特征参数提取模块对载频的检测误差减小, 出现误码性能改善的错误评估, 这是需要注意的。

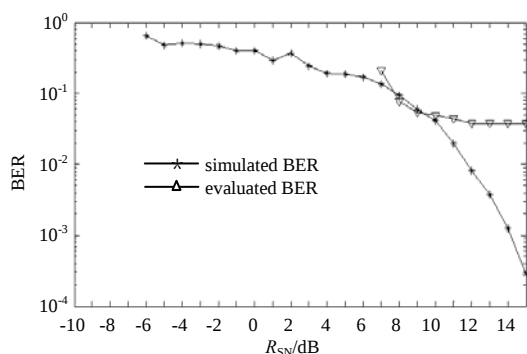


Fig.8 BER curve under the condition with AWGN
图8 白噪声干扰情况下的误码性能曲线

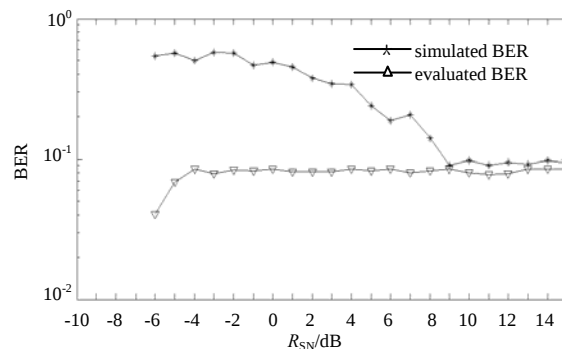


Fig.9 BER curve under the condition with AWGN and CW signal
图9 白噪声和单音干扰情况下的误码曲线

通过上面的仿真结果可以看出, 在信噪比区间[7~10] dB 内, 基于信号分析的干扰效果评估算法的有效性, 尤其是算法约 4 s 时间的评估结果输出, 可以使评估算法满足大部分的近实时要求; 但仿真也暴露可用信噪比区间过小等一些列问题, 这主要是由于通信信号特征参数的选定和提取算法造成的, 在后续研究中应就如何增加检测单调区间和减小非白噪声信号的影响进行重点关注, 其中采用多参数的提取算法结果相融合的方法应该是一个值得研究的思路。

5 结论

干扰效果的评估是通信对抗仿真试验一个重要职能和任务。随着通信技术的快速发展, 新的通信和通信对抗装备不断涌现, 对通信对抗试验方法和干扰效果评估方法的要求也不断提高。本文提出的基于信号分析的通信对抗干扰效果评估方法具有实时性好的突出特点, 非常适合作为在复杂电磁环境下干扰效果实时评估和显示的后台处理算法, 可以为通信对抗试验评估提供可行的思路和方法。

参考文献:

- [1] 杨经晓,高彦文. 战术电台自适应调零天线[J]. 现代军事通信, 1998,6(1):7-13.
- [2] 赵凯,谭启国,王锡良. 调零天线阵列设计研究[J]. 舰船电子工程, 2009,29(8):72-74.
- [3] YANG Wei,CHEN Junshi,LI Shiming,et al. Antenna Array Technique in Mobile Communication[M]. Beijing:Beijing Jiaotong University Press, 2005.)
- [4] Yeung G K,Gardner W A. Search-Efficient Methods of Detection of Cyclostationary Signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996,44(5):1214-1223.
- [5] 王满喜,李宏,马刘非,等. 一种快速有效的循环平稳信号检测方法[J]. 国防科技大学学报, 2007,29(5):85-88,94.
- [6] 张邦宁,魏安全,郭道省. 通信抗干扰技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [7] 周扬,王昌宝,周荣跃,等. 噪声干扰对超宽带通信干扰效果分析[J]. 信息与电子工程, 2010,8(4):411-414.

作者简介:



王满喜(1979-), 男, 河南省确山县人, 博士后, 主要研究方向为通信及通信对抗、电波传播.email:manxi_wang@126.com.

聂 晔(1961-), 男, 湖南省岳阳市人, 研究员, 中国人民解放军63880部队博士后工作站导师, 主要研究方向为通信及通信对抗。

黎 力(1984-), 男, 四川省绵阳市人, 工程师, 主要研究方向为通信及通信对抗。

谈东兰(1981-), 男, 广东省百色市人, 工程师, 主要研究方向为通信及通信对抗。