

文章编号: 1001-4322(2006)08-1332-05

# 超宽谱电磁脉冲对无线电引信的耦合及防护加固\*

李 刚, 毕军建, 刘尚合, 孙永卫

(机械工程学院 静电与电磁防护研究所, 石家庄 050003)

**摘 要:** 通过利用超宽谱电磁脉冲(UWS-EMP)源对 5 种无线电引信进行了辐照,分析了超宽谱电磁脉冲与无线电引信的耦合模式和作用机理。分析得出:超宽谱电磁脉冲主要是通过后门耦合到引信电源模块,引起电源波动,使晶闸管意外导通,导致引信意外发火。根据耦合模式和作用机理对引信进行了防护加固,并对防护加固后的引信进行了辐照和仿真。辐照实验和仿真结果证明:防护加固措施大大提高了引信抗超宽谱电磁脉冲的能力,加固后的引信执行电路抗 UWS-EMP 干扰的场强从  $58 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$  提高到  $130 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ,而引信的防护加固措施对引信的效能没有影响。

**关键词:** 超宽谱电磁脉冲; 无线电引信; 辐照; 防护加固; 耦合

**中图分类号:** O441.4; O536 **文献标识码:** A

国际电工委员(IEC)77 分会将入射电场强度超过  $100 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  的电磁环境称为高功率电磁环境<sup>[1]</sup>,而一般在论述高功率微波时,则是指微波源的峰值功率超过了  $100 \text{ MW}$ <sup>[2]</sup>。超宽谱(UWS)电磁脉冲是高功率微波的一种,其上升前沿陡、脉宽窄、相对频谱宽、瞬时功率高、干扰能力强<sup>[3-7]</sup>,可以干扰的引信种类多,能够对无线电引信进行全寿命期干扰<sup>[8-9]</sup>。因此研究无线电引信在强电磁环境,特别是在高功率微波条件下的辐照效应和防护加固具有重要的意义。

## 1 超宽谱电磁脉冲对无线电引信的耦合模式分析

### 1.1 实验装置和仪器

实验所用装置和仪器包括:超宽谱电磁脉冲源、TDS7404B 数字存储示波器(美国 TEK 公司,采样速率为  $20 \text{ GS/s}$ )、TEM 天线、防护用吸波屏蔽墙、屏蔽电缆、60 dB 衰减器以及某型无线电引信。其中超宽谱电磁脉冲源采用 GW 级超宽谱电磁脉冲辐射系统(如图 1 所示),该系统主要有三部分组成:紧凑型 Tesla 初级脉冲功率源,Peaking-Chopping 型高功率超宽谱亚 ns 脉冲产生器和抛物面超宽带辐射天线。

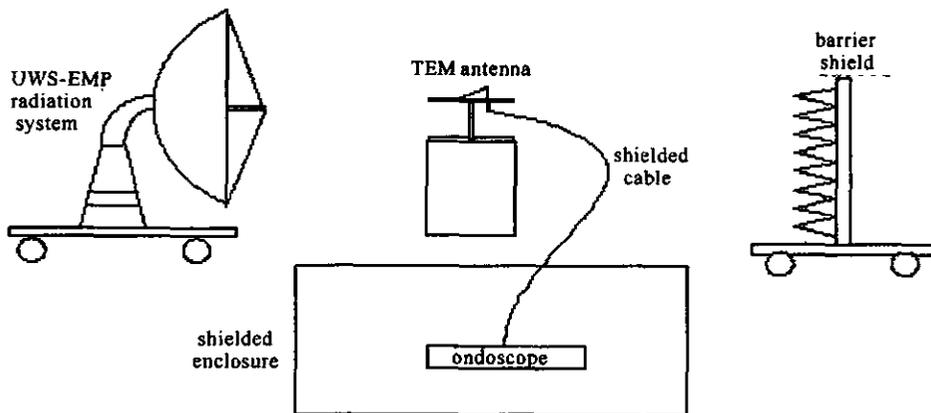


Fig. 1 Measurement of radiation field intensity from UWS

图 1 超宽谱电磁脉冲辐射场强测量实验示意图

### 1.2 实验方法

首先,用超宽谱电磁脉冲源、TEM 天线、屏蔽电缆、60 dB 的衰减器对不同距离处超宽谱电磁脉冲的辐射场强进行测量<sup>[10]</sup>,每处测量 10 次,取平均值,以减小超宽谱电磁脉冲源波动造成的误差。其次,为了确定超宽

\* 收稿日期:2006-05-17; 修订日期:2006-06-21

基金项目:国家自然科学基金重点资助课题(50237040)

作者简介:李 刚(1981—),男,硕士研究生,从事强电磁环境效应及其防护研究; ligang\_lg1011@sina.com.cn.

谱电磁脉冲对无线电引信的能量耦合模式,对以下 5 种无线电引信进行对比辐照实验,其中 A 代表完整且未屏蔽任何模块的引信,B 代表去掉自差机天线的引信;C 代表屏蔽了装定开关的引信;D 代表屏蔽了电源模块的引信;E 代表屏蔽了低频电路模块的引信。实验中超宽谱电磁脉冲源与引信的距离不小于 5 m,即实验中的辐照是在远场条件下进行的。

### 1.3 实验结果

为了确定超宽谱电磁脉冲对无线电引信的能量耦合模式,对上述 5 种未配用弹体的无线电引信进行对比辐照实验,辐照结果如表 1 所示。

表 1 5 种引信样品在不同辐照场强下的发火次数

Table 1 Firing times of five fuze samples under different radiation field intensity

field intensity/(kV · m <sup>-1</sup> )		67.7	63.6	61.4	60.4	60.3	58.2	57.0
firing times	fuze A	10	10	10	8	5	1	0
	fuze B	10	10	10	9	5	1	0
	fuze C	10	10	10	8	6	1	0
	fuze D	4	1	0	0	0	0	0
	fuze E	10	10	10	8	5	1	1

通过表 1 可以看出:A,B,C,E 4 种引信的辐照结果基本一致,因此可以排除引信自差机天线、装定开关、低频电路模块是超宽谱电磁脉冲能量的主要耦合模式的可能性。但是屏蔽了电源模块的无线电引信 D 与其它 4 种引信的辐照结果相比有了很大变化,在辐射场强小于等于 63.6 kV · m<sup>-1</sup>时,屏蔽了电源模块的引信 D 基本不发火,而其它 4 种引信在场强小于等于 58.2 kV · m<sup>-1</sup>时才基本不发火。所以可以看出引信 D 对超宽谱电磁脉冲的抗干扰能力明显改善,因此可以确定引信的电源模块是超宽谱电磁脉冲能量与无线电引信的主要耦合通道。

## 2 超宽谱电磁脉冲对无线电引信的作用机理分析

为了研究超宽谱电磁脉冲对无线电引信的作用机理,对引信执行电路<sup>[11]</sup>(如图 2 所示)和引信低频电路(如图 3 所示)进行了分析,其中图 2 中的电源由电源模块输出,发火信号由增幅速率比较电路输出,C<sub>1</sub> 为储能电容,SCR 为晶闸管,R<sub>1</sub> 为充电电阻,R<sub>2</sub> 为分压电阻,LD 为电雷管,A 点表示晶闸管 SCR 阳极的结点。执行电路的作用过程是:在发火信号到来之前,电源通过电阻 R<sub>1</sub> 对电容 C<sub>1</sub> 充电,当发火信号达到晶闸管的触发电平时,晶闸管导通,电容 C<sub>1</sub> 经晶闸管向电雷管 LD 放电使电雷管起爆。

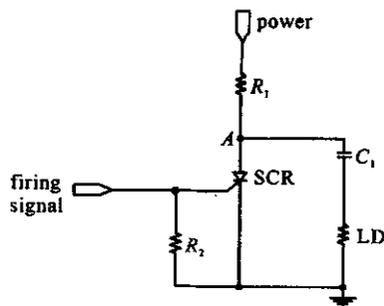


Fig. 2 Circuit diagram of executive organ

图 2 执行机构电路

通过对引信执行电路作用过程的分析,发现引信意外发火

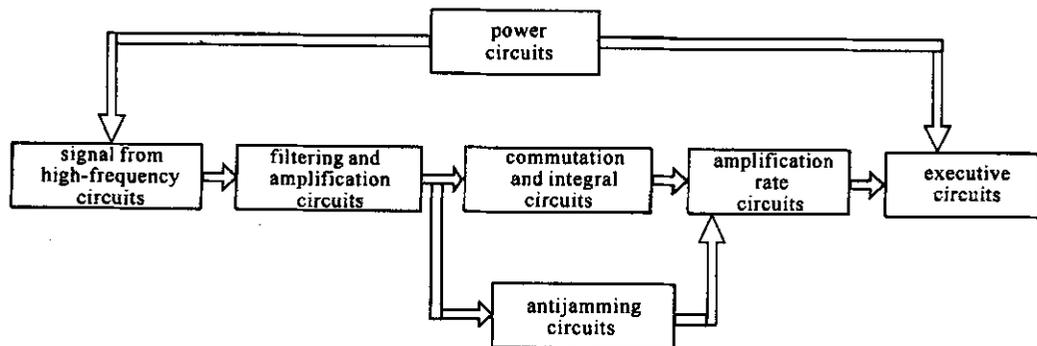


Fig. 3 Low-frequency circuits diagram of fuze

图 3 引信低频电路

有两种可能:(1)执行电路中的发火信号端意外输出信号使晶闸管导通,储能电容对电雷管放电使引信意外发火;(2)执行电路中的电源端产生波动,使晶闸管导通,储能电容对电雷管放电使引信意外发火。

通过图 3 可以看出:引信电源模块向引信自差机、低频电路模块、执行电路供电,其中低频电路模块包括滤波放大电路、整流积分电路、增幅速率比较电路、抗干扰支路。所以电源模块因超宽谱电磁脉冲引起的电源波动会对引信自差机、低频电路模块、执行电路产生影响。但是前面辐照实验已经排除了引信自差机和低频电路模块是超宽谱电磁脉冲能量的主要耦合模式的可能性,所以执行电路中的发火信号端不可能输出信号,由此得出引信意外发火是属于第二种情况。可以初步确定超宽谱电磁脉冲对无线电引信的作用机理是:超宽谱电磁脉冲耦合到引信电源模块使电源模块的输出电压产生波动,从而使晶闸管导通,储能电容对电雷管放电,引信意外发火。

### 3 防护加固

根据超宽谱与无线电引信的作用机理,又因为超宽谱电磁脉冲是上升沿和下降沿很陡的高功率微波,而且是通过无线电引信的电源对引信的执行机构起作用的,从而导致引信意外发火,所以采用在引信执行机构电源端加入一电感(L)的方法<sup>[12]</sup>对引信进行防护加固,电路见图 4,其中, $R_1, C_1, R_2, LD, A$  为晶闸管阳极的结点,电源由引信电源模块供给。

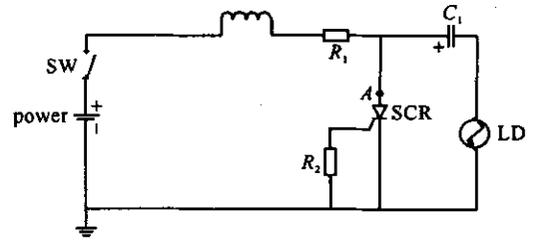


Fig. 4 Enhanced executive circuit

图 4 改进后的执行电路

为了验证防护加固措施是否有效,对引信执行机构进行改造,用电池作为执行电路的电源,以替代引信电源模块的输出,对防护加固前后的引信的执行机构进行对比辐照,每个距离处辐照 10 次,记录电雷管的发火次数,结果见表 2。

表 2 超宽谱辐照下引信执行电路加固前后的发火次数对比

Table 2 Contrast of firing times between original circuit and enhanced circuit under UWS-EMP

radiation field/( $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ )	52	57	58	60	63	70	75	83	88	94	107	118	130
firing times before enhancement	0	1	5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
firing times after enhancement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10

从表 2 的对比实验数据可以看出,改进后引信执行电路抗 UWS-EMP 干扰的场强从  $58 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$  提高到  $130 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ,对 UWS-EMP 防护能力明显提高,说明对引信的防护加固措施是有效的,也证明了对超宽谱电磁脉冲与无线电引信作用机理的分析是正确的。

### 4 仿真研究

为了验证无线电引信与超宽谱的耦合模式和作用机理,以及引信防护加固措施的有效性和可靠性,采用 ORCAD PSpice A/D 9.2 程序对引信进行了计算机仿真研究。

#### 4.1 耦合模式和作用机理的仿真

在自差机输出信号端加入超宽谱电磁脉冲信号,对超宽谱电磁作用于引信低频电路模块(电路如图 2 所

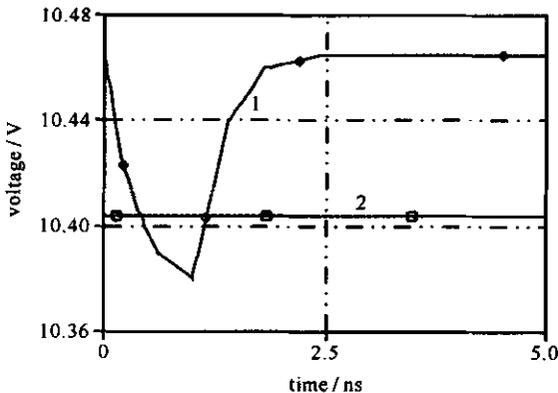


Fig. 5 UWS simulation waveform of low-frequency circuits

图 5 低频电路超宽谱仿真波形

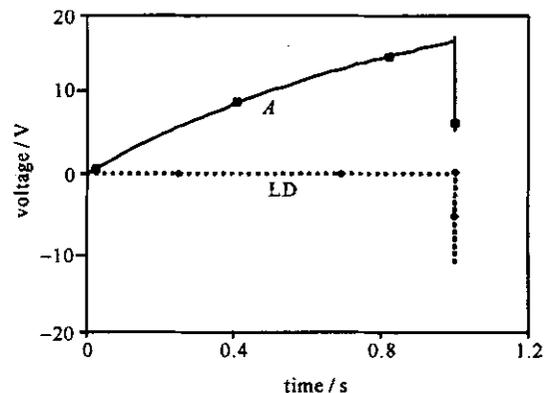


Fig. 6 Voltage simulation waveform of A point and LD of original executive circuits

图 6 防护加固前执行电路 A 点和 LD 的电压仿真波形

图 6 防护加固前执行电路 A 点和 LD 的电压仿真波形

示)的过程进行了仿真,仿真波形如图 5 所示,其中曲线 1 表示超宽谱电磁脉冲通过引信滤波放大电路后的波形,曲线 2 表示超宽谱电磁脉冲通过引信整流积分电路后的波形。由此可以看出超宽谱电磁脉冲在经过整流积分电路后已经基本被抑制,从而验证了超宽谱电磁脉冲不能通过引信自差机和低频电路模块耦合使引信意外发火这一结论。

另外,对电源模块输出电压波动导致引信意外发火进行了仿真,将发火信号端悬空,同时引信处于待发状态,对执行电路(见图 3)进行计算机分析。通过仿真波形(如图 6 所示)可以看出,晶闸管阳极 A 点的电压随着电源对储能电容的充电慢慢升高,当超宽谱电磁脉冲到达引信执行电路时,晶闸管 A 点电压急剧下降到 5 V 左右,而电雷管两端的电压急剧下降到 -10 V 左右,所以可以判断,此时晶闸管被导通,储能电容  $C_1$  开始放电,引信意外发火。

#### 4.2 防护加固的仿真研究

为了进一步验证防护加固措施的有效性,对防护加固前后的引信的执行机构(如图 3、图 4 所示)进行了仿真,仿真波形分别如图 7、图 8 所示。

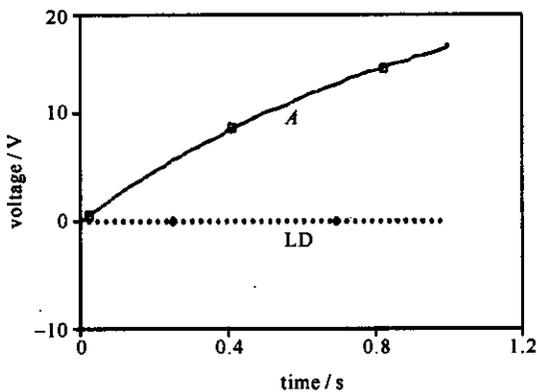


Fig. 7 Voltage simulation waveform of A point and LD of enhanced executive circuits

图 7 防护加固后执行电路 A 点和 LD 的电压仿真波形

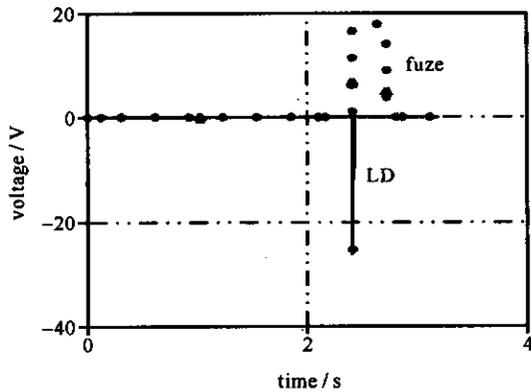


Fig. 8 Firing signal of enhanced fuze and firing waveform of LD

图 8 加固后引信的发火信号和 LD 发火时两端的波形

从图 6、图 7 防护加固前后执行电路晶闸管 A 点和电雷管的电压仿真波形可以看出:改进前执行电路的晶闸管阳极 A 点的电压在超宽谱辐照时急剧下降,电雷管两端的电压也从 0 下降到 -10 V 左右。因此根据晶闸管的参数特性可以得出晶闸管此时已经导通。而改进后执行电路的晶闸管 A 点的电压和电雷管的电压在超宽谱辐照时几乎没有变化,因此根据晶闸管的参数特性可以得出:在对执行电路改进(即加入电感)后,晶闸管没有导通。通过仿真进一步证明了防护加固措施具有良好的效果,而且也证明了超宽谱电磁脉冲与无线电引信作用机理分析的正确性。

为了研究在加入电感后是否会影响引信的效能,对加固后的整个引信进行仿真,其中发火信号和电雷管发火时两端的波形如图 8、图 9 所示。加固前引信正常发火时的波形见图 10。根据与加固前引信的仿真波形和引信正常发火时的波形对比可以看出加固前后电容  $C_1$  对电雷管的放电幅值和时间基本一致,放电幅值都在

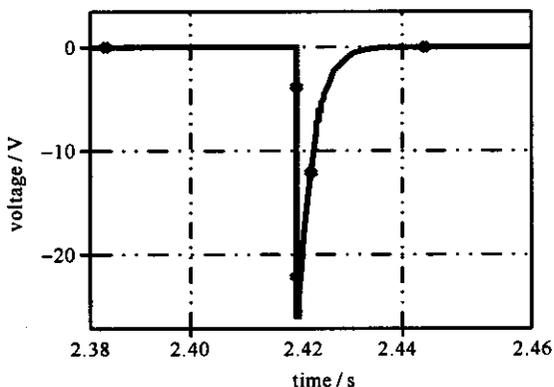


Fig. 9 LD waveform of enhanced fuze when firing  
图 9 加固后的引信发火时 LD 两端的电压波形

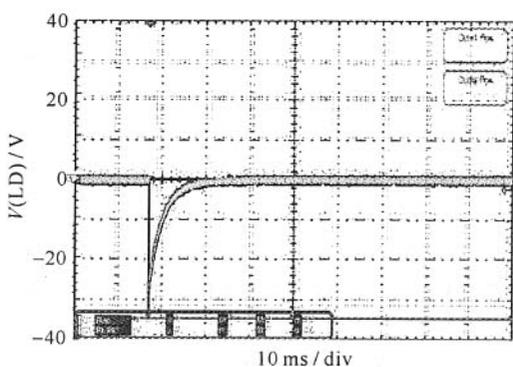


Fig. 10 LD voltage waveform of original fuze when firing  
图 10 加固前的引信正常发火时 LD 两端的电压波形

27 V 左右,放电时间都在 15 ms 左右。同时对改进前后的引信执行电路进行辐照,电雷管都能正常发火。因此可以得出:引信的加固措施对引信的效能没有影响。

## 5 结 论

通过对 5 种无线电引信的辐照实验发现:超宽谱电磁脉冲与无线电引信的作用主要是通过引信的电源模块的耦合,引起电源输出电压波动,使晶闸管导通,导致引信意外发火。在对无线电引信与超宽谱电磁脉冲耦合模式和作用机理研究的基础上对引信进行了防护加固,并对防护加固后的引信进行了超宽谱电磁脉冲辐照,辐照结果表明对引信的防护加固措施使得引信抗超宽谱电磁脉冲的能力有很大提高,加固后的引信执行电路抗 UWS-EMP 干扰的场强从  $58 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$  提高到  $130 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。通过对引信电路的仿真研究,验证了无线电引信与超宽谱电磁脉冲的耦合模式和作用机理,也进一步验证了引信防护加固的效果,并得出了引信的防护加固措施对引信的效能没有影响的结论。

## 参考文献:

- [1] Wik M W. The threat of international electromagnetic interference[C]//Proc of Asia-Pacific CEEM. Shanghai, 2000:17-19.
- [2] 李传庐. 新概念武器[M]. 北京:国防工业出版社,1999. (Li C L. New concept weapons. Beijing: National Defense Industry Press, 1999)
- [3] Prather W D, Baum C E, Lehr J M, et al. Ultra-wideband source research[C]//IEEE Pulsed Power Conference. 1999:119-130.
- [4] Andreev Y A, Buyanov Y I, Efremov A M, et al. High-power ultra-wideband electromagnetic radiation generator[C]//11<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conf, 1997:730-735.
- [5] Agee F J, Prather W D, Baum C E, et al. Ultra-wideband transmitter research[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1998, **26**(3):860-873.
- [6] 黄裕年,任国光. 高功率超宽带电磁脉冲技术[J]. 微波学报, 2002, **18**(4):90-94. (Huang Y N, Ren G G. EMP technique of high power UWB. *J of Microwave*, 2002, **18**(4):90-94)
- [7] 龚世明. 超宽带无线电技术及其进展[J]. 航空电子技术, 2003, **34**(1):1-8. (Gong S M. UWB radio engineering technique and its development. *Aviation Electron Technique*, 2003, **34**(1):1-8)
- [8] 吕显哉. 引信电子对抗环境威胁及其对策[J]. 现代引信, 1997, (1):56-62. (Lü X Z. Fuze's electron against environmental imperilment and countermeasure. *Modern Fuze*, 1997, (1):56-62)
- [9] 杜汉卿. 无线电引信抗干扰原理[M]. 北京:兵器工业出版社,1989. (Du H Q. Anti-jamming principle of radio fuze. Beijing: Ordnance Industry Press, 1989)
- [10] 孟凡宝,杨周炳,马弘舸,等. 100MW 重复频率超宽带脉冲辐射源的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1998, **10**(2):279-282. (Meng F B, Yang Z B, Ma H G, et al. The experimental research of 100 MW repeat frequency UWB pulse radiant point. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(2):279-282)
- [11] 李彦学,智敬旺. 无线电与电子时间引信[M]. 北京:兵器工业出版社,1999. (Li Y X, Zhi D W. Radio and electrical time fuze. Beijing: Ordnance Industry Press, 1999)
- [12] 杨克俊. 电磁兼容原理与设计技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2004. (Yang K J. EMC principle and design technique. Beijing: Posts and Telecom Press, 2004)

## Coupling mechanism between radio fuzes and ultra band spectra electromagnetic pulse and enhancement of radio fuzes

LI Gang, BI Jun-jian, LIU Shang-he, SUN Yong-wei

(Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** Five kinds of radio fuzes are irradiated by UWS-EMP, and coupling pattern and working mechanism between radio fuzes and the energy of UWS-EMP are analysed based on irradiation experiments. Analysis results show that the energy of UWS-EMP couples to fuzes via the power module of fuzes, causes silicon control rectifier conduction, and results in fusing. The radio fuzes are enhanced based on the coupling pattern and working mechanism. The improved fuzes are irradiated and simulated. The results indicate that the enhancement has greatly improved the ability of the radio fuzes against UWS-EMP. The enhancement doesn't influence the efficiency of the fuzes.

**Key words:** UWS-EMP; Radio fuze; Irradiation; Amelioration; Coupling