

引用格式: ZHANG Xuehan, SU Tong, SHENG Lizhi, et al. Theoretical and Experimental Research of X-ray Communication in Shielded Environment[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11):1134002

张雪晗, 苏桐, 盛立志, 等. 屏蔽环境下 X 射线通信传输理论与实验研究[J]. 光子学报, 2021, 50(11):1134002

# 屏蔽环境下 X 射线通信传输理论与实验研究

张雪晗<sup>1,2</sup>, 苏桐<sup>1</sup>, 盛立志<sup>1</sup>, 刘永安<sup>1</sup>, 赵宝升<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**通过 X 射线与物质的相互作用理论模型,研究了在电磁屏蔽环境下 X 射线的透过率和通信性能,理论上证明了 X 射线通信用于电磁屏蔽环境中信息传输的可行性。建立屏蔽环境下 X 射线通信的数值仿真模型,分析了 X 射线在电磁屏蔽环境下的通信参数,实现了对核心元器件的指标约束。最后,基于 X 射线调制发射、单光子 X 射线探测关键技术,搭建模拟电磁屏蔽环境下的 X 射线通信演示验证系统,进行 X 射线穿透屏蔽材料的等效模拟实验,实现了通信速率优于 23 kbps 的 X 射线通信实验验证。该结果有望为解决屏蔽环境下的辐射数据传输提供一定的理论依据和实验基础。

**关键词:**X 射线通信;辐射屏蔽;X 射线源;X 射线探测;功率传输模型

中图分类号:O434.14

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215011.1134002

## Theoretical and Experimental Research of X-ray Communication in Shielded Environment

ZHANG Xuehan<sup>1,2</sup>, SU Tong<sup>1</sup>, SHENG Lizhi<sup>1</sup>, LIU Yongan<sup>1</sup>, ZHAO Baosheng<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the theoretical model of the interaction between X-rays and matter, the transmission characteristics of X-rays in an electromagnetic shielding environment are studied, and the feasibility of X-rays communication for information transmission in an electromagnetic shielding environment is theoretically demonstrated. After that, a numerical simulation model of X-ray communication in a shielded environment is established, and the communication parameters of X-rays in an electromagnetic shielded environment are analyzed to achieve the index constraint of the core components. Finally, based on the key technologies of X-ray modulated emission and single-photon X-ray detection, an equivalent verification experiment of X-ray passing through the shielding material is conducted to realize the experimental verification of X-ray communication with a communication rate better than 23 kbps. The results are expected to provide some theoretical basis and experimental foundation for solving the radiation data transmission in a shielded environment.

**Key words:** X-ray communication; Radiation shielding; X-ray source; X-ray detection; Power transmission equation

**OCIS Codes:** 060.4510; 350.5610; 340.7480

基金项目:国家自然科学基金(No.61901470),陕西省重点研发计划(No. 2020GY-032)

第一作者:张雪晗(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为 X 射线产生与通信。Email: zhangxuehan@opt.cn

导师:盛立志(1980—),男,研究员,博士,主要研究方向为 X 射线探测与应用技术及单光子探测。Email: lizhi\_sheng@opt.ac.cn

通讯作者:苏桐(1988—),男,助理研究员,博士,主要研究方向为 X 射线通信与单光子探测。Email: sutong@opt.ac.cn

收稿日期:2021-05-11;录用日期:2021-07-27

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

2020年6月,芬兰、爱沙尼亚和全面禁止核试验条约国际监测系统放射性核素台站监测到大气中的放射性核素,据分析这些核素可能来自反应堆运行过程中的核泄露<sup>[1]</sup>。反应堆的钢制安全壳作为保护核电机组的最后一道屏障,对防止核素外泄发挥着至关重要的作用<sup>[2-3]</sup>。因此,对安全壳内的关键环境参数进行实时监测与传输,是维护核电站正常运行,事故工况下安全保障的关键手段<sup>[4]</sup>。

反应堆是钢制密闭容器,微波和可见光等低频电磁波无法穿透安全壳进而实现数据传输。目前,核电站反应堆主要采用传统的有线网络实现数据传输<sup>[5]</sup>,但有线电缆会破坏安全壳的密闭性和完整性,且有线传输会受到传输距离的限制,检测和维修的成本较高。因此,如何实现反应堆安全壳内外无线通信成为了一个亟待解决的问题。为了实现电磁屏蔽环境下的通信,人们先后提出了一些新的通信方式。2016年,全球能源互联网集团有限公司提出了一种无线光通信系统来抵抗电磁干扰<sup>[6]</sup>,但是光子无法穿透安全壳进而实现反应堆内外通信。华北电力大学陈伟等设计了应用于安全壳内外无线通信的超声通信系统<sup>[5]</sup>,但超声波在金属界面的全反射会导致信号的严重衰减,限制了其应用场合。

X射线是波长范围在0.01~10 nm之间的电磁波,其频率高、单光子能量大、穿透能力强<sup>[7]</sup>。2007年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出了X射线通信的概念,并计划于2025年实现太空应用<sup>[8-9]</sup>。X射线通信技术作为一种无线通信技术,其最大的潜在应用是在一些传统的通信方式无法应用的场合中实现数据传输,如超高速飞机通信和飞行器返回地球时进入黑障区的通信<sup>[10-11]</sup>,深空远距离通信<sup>[12]</sup>,火星沙尘暴环境下的通信<sup>[13]</sup>,编队小卫星间通信等。X射线通信有望应用于反应堆安全壳内外通信,在不破坏安全壳完整性的同时,提高了系统冗余、经济性及安全性。

本文面向核反应堆安全壳内外通信的需求,提出一种利用X射线作为通信载波来实现辐射屏蔽环境下数据传输的通信方案,为强辐射场金属密闭空间内的测量数据提供了实时传输手段。通过数值分析与仿真,计算了屏蔽环境下能量小于1 MeV的X射线穿过不同厚度钢板的传输特性,理论证明了X射线用于电磁屏蔽环境信息传输的可行性,并进行等效验证实验,得到了X射线在3 cm厚钢板的电磁屏蔽环境下的通信性能,为解决屏蔽环境下的辐射数据传输提供了一定的理论依据和实验基础,并为保密通信及复杂电磁环境下的通信保障提供了新的思路,推动无线通信安全领域的发展。

## 1 数值分析

X射线可以看作是由大量光量子组成的高能光子流,所以辐射屏蔽环境下的X射线通信机理实际上是高能光子与屏蔽金属材料间的相互作用问题。如图1,当一束强度为 $I_0$ ,波长为 $\lambda$ 的入射X射线光子穿过金属屏蔽材料时,会与金属原子核及其核外电子发生相互作用,即散射和光电效应,使入射X射线强度发生衰减,其衰减规律遵循Lambert-Beer定律<sup>[14]</sup>,具体表示为

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\mu}{\rho} \rho x\right) \quad (1)$$

$$\mu = \sigma n_0 \quad (2)$$

式中, $I$ 是透射X射线强度, $I_0$ 是入射X射线强度, $x$ 为金属屏蔽层厚度, $\frac{\mu}{\rho}$ 为质量衰减系数, $\sigma$ 为衰减微分截面, $n_0$ 为金属屏蔽层单位体积中的原子数。

瑞利散射发生在X射线与束缚较牢固的内层轨道电子之间<sup>[15]</sup>。对于能量远高于原子的K吸收边的X射线光子,其瑞利散射微分截面 $\sigma_{\text{coh}}$ 可表示为<sup>[16-17]</sup>

$$\sigma_{\text{coh}}(E) = \pi r_e^2 \int_0^\pi (1 + \cos^2 \theta) |F(x, Z)|^2 \sin \theta d\theta \quad (3)$$

式中, $r_e$ 为电子的经典半径, $\theta$ 为散射角, $F(x, Z)$ 是形状因子,即电荷空间分布的傅里叶变换。 $F(x, Z)$ 随着入射光子能量的增大而减小,对于低能X射线光子, $F(x, Z) \approx Z$ <sup>[18]</sup>即 $\sigma_{\text{coh}} \approx \frac{8}{3} \pi r_e^2 Z^2$ 。因此,根据式(3)计算得出,对于低能X射线光子,其在金属铁中的瑞利散射质量衰减系数的最大值为4.834,远小于其他效应的质量衰减系数,因此可忽略瑞利散射对总衰减的影响。

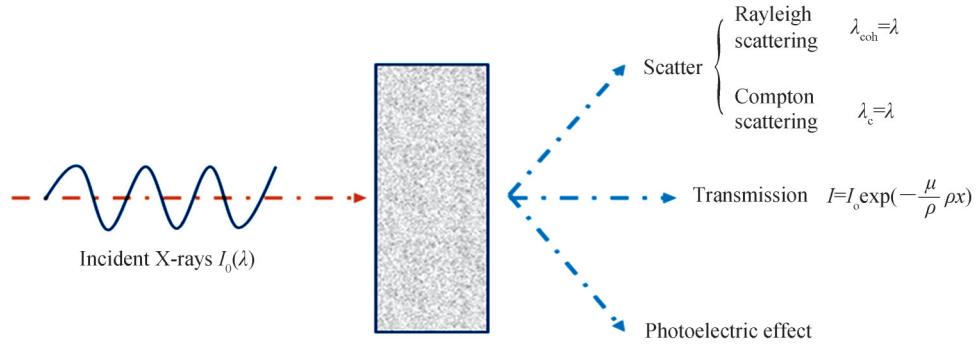


图1 X射线与物质的相互作用

Fig.1 X-ray and matter interaction mechanism.

康普顿散射发生在X射线与结合松弛的外层轨道电子之间<sup>[19]</sup>,其散射截面可由Klein-Nishina公式表示<sup>[20]</sup>为

$$\sigma_c = 2\pi r_e^2 \left\{ \frac{1+a}{a^2} \left[ \frac{2(1+a)}{1+2a} - \frac{1}{a} \ln(1+2a) \right] + \frac{1}{2a} \ln(1+2a) - \frac{1+3a}{(1+2a)^2} \right\} \quad (4)$$

式中, $a=h\nu/m_e c^2$ , $h\nu$ 为X射线光子能量, $m_e c^2$ 为电子的静止能量。根据式(2)可得钢板对入射光子的康普顿散射质量衰减系数,即式(5),其中 $A$ 为原子量。

$$\frac{\mu_c}{\rho} = \frac{N_A Z}{A} \sigma_c = 0.1394 \times \left\{ \frac{1+a}{a^2} \left[ \frac{2(1+a)}{1+2a} - \frac{1}{a} \ln(1+2a) \right] + \frac{1}{2a} \ln(1+2a) - \frac{1+3a}{(1+2a)^2} \right\} \quad (5)$$

在光电效应截面中, $K$ 壳层电子的截面约为总截面的80%, $K$ 壳层的光电效应截面 $\sigma_K$ 为<sup>[21]</sup>

$$\sigma_K = \begin{cases} \sqrt{32} b^4 \left( \frac{m_e c^2}{h\nu} \right)^{\frac{7}{2}} Z^5 \sigma_{th} & h\nu \ll m_e c^2 \\ 1.5 b^4 \frac{m_e c^2}{h\nu} Z^5 \sigma_{th} & h\nu \gg m_e c^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $b$ 是精细结构常数, $\sigma_{th}$ 为Thomson截面,取值为 $6.65 \times 10^{-25}$ 。

钢板对入射光子的光电效应质量衰减系数可表示为

$$\frac{\mu_{opt}}{\rho} = \frac{1.25 N_A}{A} \sigma_K = \begin{cases} \frac{1.25 N_A}{A} \sqrt{32} b^4 \left( \frac{m_e c^2}{h\nu} \right)^{\frac{7}{2}} Z^5 \sigma_{th} & h\nu \ll m_e c^2 \\ \frac{1.25 N_A}{A} 1.5 b^4 \frac{m_e c^2}{h\nu} Z^5 \sigma_{th} & h\nu \gg m_e c^2 \end{cases} \quad (7)$$

因此,屏蔽钢板对较高能量的X射线光子的透过率 $y(x, E)$ 可表示为

$$y(x, E) = \begin{cases} \exp \left\{ -\rho x \left[ \frac{\mu_c}{\rho} + 0.0017 \left( \frac{E}{511} \right)^{-\frac{7}{2}} \right] \right\} & h\nu \ll m_e c^2 \\ \exp \left\{ -\rho x \left[ \frac{\mu_c}{\rho} + 0.0004522 \left( \frac{E}{511} \right)^{-1} \right] \right\} & h\nu \gg m_e c^2 \end{cases} \quad (8)$$

屏蔽环境下X射线功率传输方程<sup>[22]</sup>可表示为

$$N_D = \frac{y(x, E) \cdot \eta_d}{\pi \left( L \tan \frac{\varpi}{2} \right)^2} N_s \quad (9)$$

式中, $N_D$ 是探测器端探测到的光子数目, $L$ 为X射线传输距离, $\varpi$ 为出射X射线发散角, $\eta_d$ 是探测器的探测效率,对能量小于1 MeV的X射线光子,NaI闪烁体探测器的探测效率大于50%<sup>[23]</sup>, $N_s$ 是X射线源出射的X射线光子数。

图2给出了基于式(8)得到的X射线与钢制安全壳的透过率特性,可以看出,50 keV的X射线光子可以穿过1 mm厚的钢,而对于3 cm厚的钢,300 keV的单能X射线可以实现7.67%的透过率。根据屏蔽环境下X射线的功率传输方程和误码率模型<sup>[24]</sup>,图3给出了在OOK调制模式下,不同能量的X射线光子在不同厚度钢制安全壳下的通信速率,对于能量为300 keV的入射X射线光子,穿过3 cm厚的屏蔽钢板,可实现433 bps的通信速率。理论上证明了X射线可用于屏蔽环境下通信的可能性。

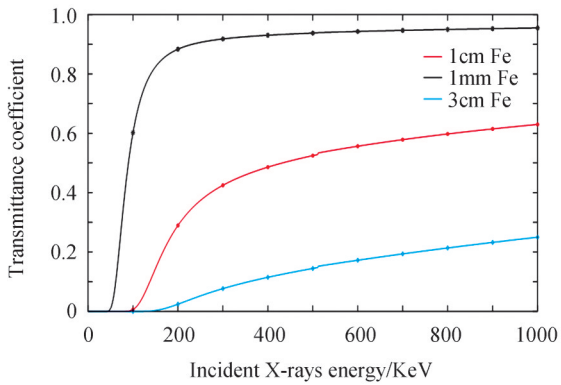


图2 钢制安全壳对X射线的透过率

Fig.2 Transmission rate of X-rays by steel containment

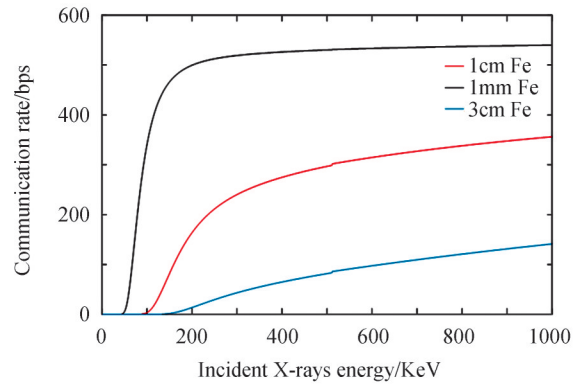


图3 不同能量光子在不同厚度屏蔽钢制安全壳下的通信速率

Fig.3 Communication rate for different photon energies with different thicknesses of shielded steel containment

## 2 模拟仿真

在屏蔽环境X射线通信中,探测器端接收到的光子数目是衡量通信性能的重要指标。通过基于蒙特卡罗方法的MCNP软件,建立了如图4所示的屏蔽环境下X射线通信的仿真模型,其中调制X射线源采用反射式结构,出射X射线的传输距离为10 m。

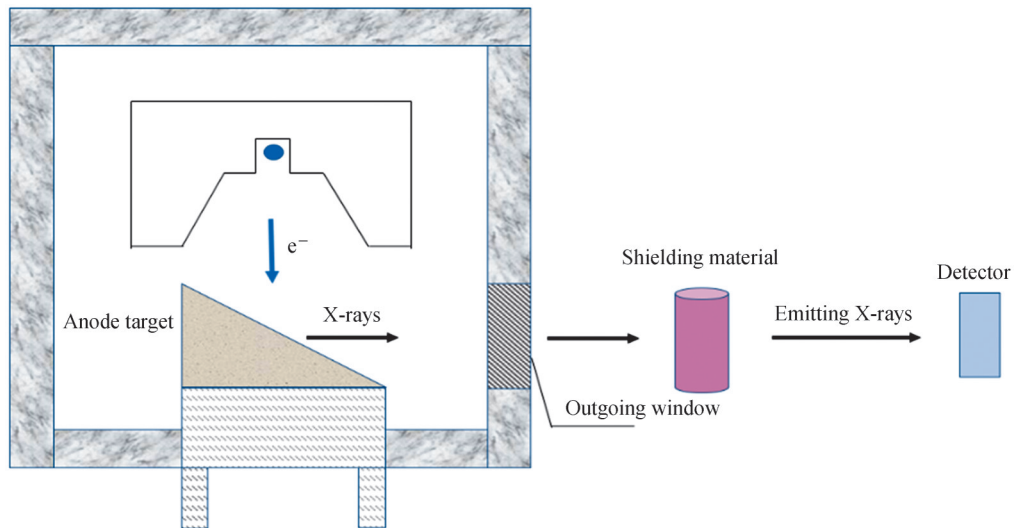


图4 屏蔽环境下X射线通信的仿真模型

Fig.4 Simulation model of X-ray communication in shielded environment

仿真结果如表1,阳极电压为300 kV,阳极电流为200  $\mu\text{A}$ 的调制X射线源出射的X射线,穿过3 cm厚的屏蔽钢板后,单位面积探测器探测到的光子数目为 $4.43 \times 10^6$ 。由于现存的X射线产生方式的限制,X射线通信无法通过频率和相位进行调制,当前主要以强度调制/直接检测IM/DD(Intensity Modulation/Direct Detection)为主<sup>[25]</sup>。在IM/DD系统中,发射端通过对光载波的强度调制来传递信号,接收端通过探测器和电子学系统直接将光信号转换成电信号,其中最常用的是开关键控(On-Off Keying,OOK)调制方式,通过

在一定频率的时间间隔下开通和关断光源即可实现调制。根据误码率计算模型<sup>[26]</sup>,若采用OOK调制,理论上最高可实现通信速率 260 kbps、误码率  $10^{-6}$  量级的 X 射线通信。脉冲位置调制(Pulsed Position Modulation, PPM)是一种使光源发射的光脉冲序列中的每一个光脉冲,从标称位置上按照与信息信号的采样值呈线性关系移动的调制方式<sup>[9]</sup>,当采用 4 PPM 调制时,误码率  $10^{-6}$  量级下的 X 射线通信速率为 340 kbps,若采用 16 PPM 调制,通信速率可达 369 kbps,但相比于 OOK 调制方式,PPM 调制增加了对于带宽的要求。

表 1 不同仿真条件下探测端探测到的光子数目  
Table 1 The number of photons detected under various simulation conditions

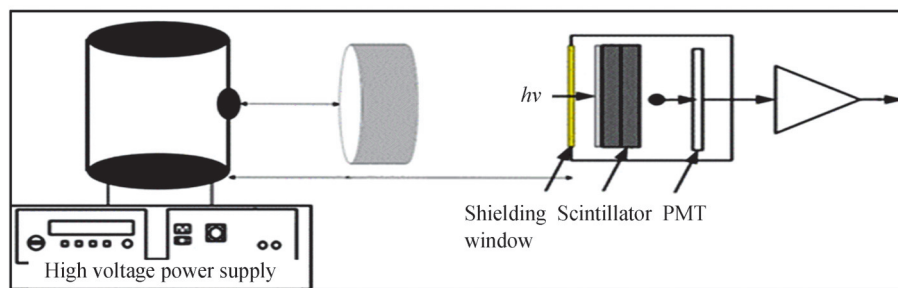
| Shielding materials | Simulation conditions                               | Thickness/mm | Communication indicators/(photons $\cdot$ cm $^{-2}$ ) |
|---------------------|---|--------------|--|
| Fe                  | Anode voltage: 300 kV<br>Anode current: 200 $\mu$ A | 1            | $2.0 \times 10^8$                                      |
|                     |   | 10           | $3.69 \times 10^7$                                     |
|                     |   | 30           | $4.43 \times 10^6$                                     |
| Al                  | Anode voltage: 30 kV<br>Anode current: 200 $\mu$ A  | 1            | $4.0 \times 10^6$                                      |
|                     |   | 10           | $3.76 \times 10^4$                                     |
|                     |   | 30           | $1.14 \times 10^4$                                     |

此外,当阳极电压为 30 kV,屏蔽材料为 1 mm 厚的金属铝时,到达探测器端的光子数目为  $4.0 \times 10^6$ ,略小于  $4.43 \times 10^6$ 。因此,可以用 30 kV 阳极高压,X 射线穿透 1 mm 厚金属铝后的通信效果对 300 kV 阳极高压辐射通信的通信性能做出等效验证。

### 3 实验验证

为了验证屏蔽环境下 X 射线通信的可行性,搭建如图 5 所示的演示验证系统<sup>[27]</sup>,其中,栅控 X 射线源(Gird Control Modulated X-ray Tube, GCMXT)和闪烁体探测器分别放置在屏蔽材料的两端,探测器将透过屏蔽材料后到达该位置的 X 射线光子收集并输出分立的电脉冲信号送至示波器端显示,并对通信效果进行评估与测试。

图 5(c)给出了封装后的栅控 X 射线调制发射源实物图,通过在传统的 X 射线管中引入栅极来限制 X 射线管内的电子通断,从而实现出射 X 射线的强度调制。在 X 射线的通信过程中,只经历了电信号-电子-X 射线光子的转换过程,且不需要复杂的外部电路,因此可实现高速 X 射线调制发射。图 5(d)给出了封装后的闪烁体探测器实物图,闪烁体受到 X 射线光子照射后激发出光子,光电倍增管(Photo-Multiplier Tube,



(a) Schematic diagram



(b) Physical diagram

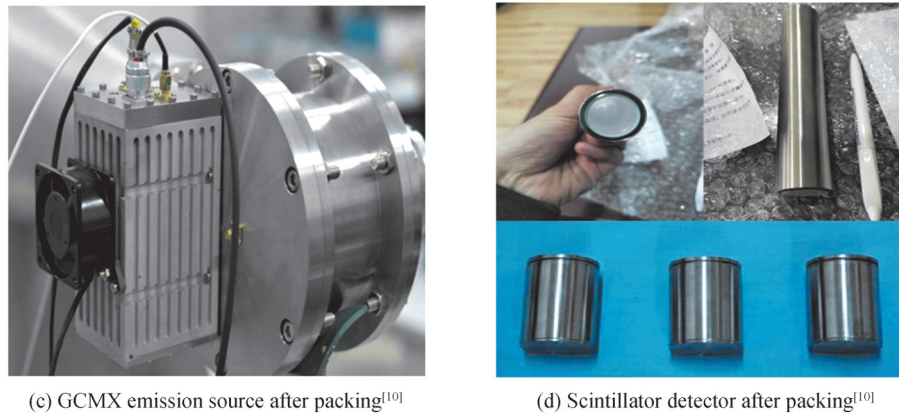


图5 实验原理图与现场图

Fig. 5 Experimental schematic and field diagram

PMT)将光子转换为电子,经过倍增后最终被读出。其中,闪烁体材料为3 mm厚的无机闪烁体NaI(Tl)晶体,对于能量小于662 keV的X射线,其发光效率可达92%以上。

实验中,选择能量更低的X射线源出射的X射线,在屏蔽环境为1 mm厚金属铝下的传输特性,对钢制安全壳下的X射线通信进行等效验证。如图6所示,当阳极高压为30 kV,阳极电流为200  $\mu$ A时,X射线源出射的X射线在穿透1 mm金属Al后,可达到23 kbps的通信速率。基于提出的屏蔽环境下X射线的功率传输模型式(9),X射线在屏蔽环境下的通信性能与屏蔽材料对X射线的透过率成正比,如探测器端探测到的光子数相同,则在相同的调制模式下X射线的通信性能相同。因此,若采用阳极高压为300 kV,阳极电流为200  $\mu$ A的栅控X射线源,其出射的X射线穿过3 cm厚的屏蔽钢板后,理论上最低可实现23 kbps的通信速率。

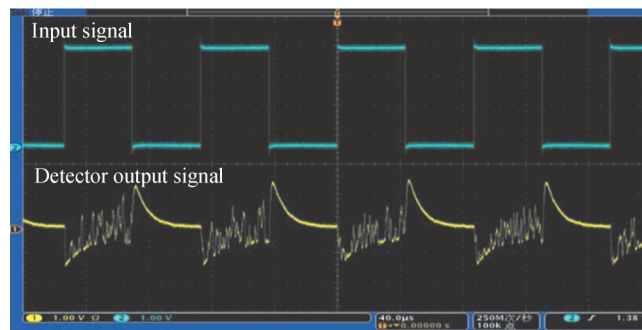


图6 金属屏蔽环境下X射线通信验证

Fig.6 X-ray communication verification in shielded environment

## 4 结论

本文基于X射线单光子能量大、穿透能力强的特性,利用硬X射线作为通信载波,结合大流量、高速X射线调制发射技术、单光子X射线探测技术,进行了屏蔽环境下X射线通信的方案研究。同时通过理论分析与仿真建模,证明了X射线用于电磁屏蔽环境信息传输的可行性。并进行了屏蔽环境下X射线通信的等效验证实验,实现了通信速率优于23 kbps的通信验证。本文为下一步研究X射线通信在信息保密传输及复杂电磁环境中的应用,奠定了一定的理论与实验基础,同时为复杂源项的屏蔽设计优化提供了参考。

### 参考文献

- [1] WANG Shilian, LI Qi, ZHAO Yungang, et al. Technical analysis of low-concentration airborne  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{103}\text{Ru}$  and other radionuclides in Northern Europe in June 2020[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(21): 220-227.  
王世联,李奇,赵允刚,等.2020年6月北欧大气中微量 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{103}\text{Ru}$ 等放射性核素的技术分析[J].

- 物理学报,2020,69(21):220-227.
- [2] XIAO Aiwu, SHI Huan, ZHANG Le, et al. The ultrasonic imaging inspection for butt welding of steel containment vessel [J]. *Nondestructive Testing*, 2019, 41(10): 1-5+20.  
肖爱武,石欢,张乐,等.钢制安全壳对接焊缝的超声波成像检测[J].无损检测,2019,41(10):1-5+20.
- [3] ZHAN Xia, MA Yanling, ZHANG Peng, et al. Non-destructive testing means for nuclear power plant safety barriers [J]. *China Science and Technology Information*, 2018(21): 96-97.  
詹霞,马艳玲,张鹏,等.核电站安全屏障无损检测手段[J].中国科技信息,2018(21):96-97.
- [4] 陈伟.基于超声波的反应堆安全壳无线通信技术研究[D].北京:华北电力大学(北京),2017.
- [5] CHEN Wei, YU Qian, CHENG Xiaolei, et al. Ultrasonic wireless communication technology in reactor containment [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2016, 36(1): 10-14.  
陈伟,余谦,程晓磊,等.反应堆安全壳超声波无线通信技术研究[J].核电子学与探测技术,2016,36(1):10-14.
- [6] ZHOU Z, KAVEHRAD M, LI W, et al. Optical wireless communications in high-voltage power grid environment [C]. *IEEE*, 2016: 42-47.
- [7] LI Yao, SU Tong, LEI Fan, et al. analysis of x-ray transmittance in plasma and research on potential communication applications [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(4): 27-34.  
李瑶,苏桐,雷凡,等.等离子体中X射线透过率分析及潜在通信应用研究[J].物理学报,2019,68(4):183-191.
- [8] LI Huan, TANG Xiaobin, HANG Shuang, et al. Re-entry blackout elimination and communication performance analysis based on laser-plasma-induced X-ray emission [J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(3): 033503.
- [9] ZHAO Baosheng, SU Tong, SHENG Lizhi, et al. Introduction to space X-ray communication [M]. Beijing: Science Press, 2016.  
赵宝升,苏桐,盛立志,等.空间X射线通信概论[M].北京:科学出版社,2016.
- [10] 苏桐.等离子体鞘套中的X射线通信理论与技术研究[D].西安:中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所),2020.
- [11] CHEN Wenxuan, LIU Yunpeng, TANG Xiaobin, et al. Experimental evaluation of an OFDM-PWM-based X-ray communication system. [J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3596-3608.
- [12] LYNN J. NASA set to demonstrate X-ray communications in space [EB/OL]. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-set-to-demonstrate-x-ray-communications-in-space/>.
- [13] HANG Shuang, TANG Xiaobin, LI Huan, et al. Potential application of X-ray communication in Martian dust storm [J]. *Acta Astronautica*, 2020, 166: 277-289.
- [14] ŞAKAR E, ÖZPOLAT Ö F, ALIM B, et al. Phy-X/PSD: development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, 166: 108496.
- [15] GAO Xinhua, SONG Wuyuan, DENG Saiwen, et al. Practical X ray spectrum analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.  
高新华,宋武元,邓赛文,等.实用X射线光谱分析[M].北京:化学工业出版社,2017.
- [16] PATERNÒ G, CARDARELLI P, GAMBACCINI M, et al. Comprehensive data set to include interference effects in Monte Carlo models of x-ray coherent scattering inside biological tissues [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2020, 65(24): 245002.
- [17] BATCHELAR D L, CUNNINGHAM I A. Material-specific analysis using coherent-scatter imaging [J]. *Medical Physics*, 2002, 29(8): 1651-1660.
- [18] RUSSO P. 2.01 Physical basis of X-ray imaging [J]. *Comprehensive Biomedical Physics*, 2014: 1-48.
- [19] 屠耀元.射线检测工艺学[M].北京:航空工业出版社,1989.
- [20] MANRIQUE J P O. Measurement and reconstruction of high-energy photon beam spectra using Compton spectrometry [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 985: 164684.
- [21] 李宏杰,赵巨岩,王道荣,等.低能X射线在铝合金材料中的能量沉积[C].绵阳:中国核学会,2015: 339-343.
- [22] LI Yao, SU Tong, SHI Feng, et al. Bit error rate analysis of the spatial X-ray communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 210-216.  
李瑶,苏桐,石峰,等.空间X射线通信系统误码率分析[J].红外与激光工程,2018,47(6):210-216.
- [23] HUANG Jianwei, WANG Naiyan. Efficiency calibration for a NaI scintillation detector based on Monte-Carlo process and preliminary measurements of bremsstrahlung [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 164-170.  
黄建微,王乃彦.基于蒙特卡罗方法的NaI探测器效率刻度及其测量韧致辐射实验[J].物理学报,2014,63(18): 164-170.
- [24] WANG Lvqiang, SU Tong, ZHAO Baosheng, et al. Bit error rate analysis of X-ray communication system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 119-123.  
王律强,苏桐,赵宝升,等.X射线通信系统的误码率分析[J].物理学报,2015,64(12):119-123.

- [25] MU Junxu, TANG Xiaobin, LIU Yunpeng, et al. High penetration X-ray communication under physical shielding[J]. Journal of X-ray Science and Technology, 2020, 28(2): 187-196.
- [26] SU Tong, LI Yao, SHENG Lizhi, et, al. Space X-ray communication link modeling and power analysis[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(10):212-219.  
苏桐,李瑶,盛立志,等.空间X射线通信链路建模与功率分析[J].光子学报,2017,46(10):212-219.
- [27] XU Neng, SHENG Lizhi, ZHANG Dapeng, et, al. Development and performance test of dynamic simulation system for X-ray pulsar navigation[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(5):334-340.  
徐能,盛立志,张大鹏,等.X射线脉冲星导航动态模拟实验系统研制与性能测试[J].物理学报,2017,66(5):334-340.