

基于波形诱骗的末敏弹毫米波有源干扰研究

陈曦¹, 陈自力², 许建中¹, 孟春祥¹

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094; 2. 空军勤务学院, 江苏 徐州 221000)

摘要: 根据末敏弹毫米波交流辐射计探测金属目标时弹目交会特点和信号处理电路特性, 提出了一种基于波形诱骗的毫米波有源干扰新方法。分析并建立了辐射计探测干扰源信号时的天线温度模型, 与探测地面金属目标相比, 天线温度信号脉宽明显展宽, 幅度保持恒定。该信号经视频放大器低频截止作用后, 使输入的等幅宽时信号发生频率失真, 输出具有正、负脉冲形式的波形分裂信号, 其中负脉冲部分可以模拟探测地面金属目标的输出信号。实验结果验证了设计方法的正确性和有效性, 为毫米波末敏弹有源干扰提供了一种可行的方法。

关键词: 兵器科学与技术; 末敏弹; 有源干扰; 波形诱骗; 宽时信号; 毫米波交流辐射计
中图分类号: TN972⁺.1; TJ413⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2014)01-0049-06
DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.01.007

Study of Millimeter-wave Active Jamming Based on Waveform Deception for Terminal-sensitive Projectiles

CHEN Xi¹, CHEN Zi-li², XU Jian-zhong¹, MENG Chun-xiang¹

(1. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 2. Air Force Logistics College, Xuzhou 221000, Jiangsu, China)

Abstract: According to the characteristics of the encounter between terminal-sensitive projectile and metal target and the signal processing circuit of millimeter-wave (MMW) alternating current radiometer, a novel method of MMW active jamming based on waveform deception is proposed. An antenna temperature model for the interference source detection is analyzed and established. The antenna temperature signal has wider pulse width and constant amplitude compared with the output signal in ground metal target detection. Then the signal frequency is distorted by the inherent low-frequency cut-off feature of the video amplifier in the radiometer, generating the split signals of positive and negative pulse waveforms, in which the negative waveform pulse can be used to simulate the output signal in ground metal target detection. The experimental results demonstrate the validity and feasibility of the proposed method, which provides an approach for MMW terminal-sensitive active jamming.

Key words: ordnance science and technology; terminal-sensitive projectile; active jamming; waveform deception; widetime signal; millimeter-wave alternating current radiometer

收稿日期: 2013-01-15

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20100481151)

作者简介: 陈曦(1984—), 女, 博士研究生。E-mail: 10ex14@163.com;

许建中(1958—), 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: xjz2018@163.com

0 引言

末端敏感弹药(简称末敏弹)是一种能够在弹道末段自动探测、识别目标并使战斗部朝着目标方向引爆的智能弹药,具有作战距离远、命中概率高、毁伤威力大、高效费比和“打了不管”等特点^[1-3]。在 21 世纪信息化战场上,末敏弹已经成为坦克装甲集群的重大威胁,可以对远距离装甲集群目标实施装甲防护和主动拦截难以抵御的有效攻击。因此,通过电子对抗手段对末敏弹探测和识别目标进行干扰,降低末敏弹的打击效能,是一种必要的技术策略,具有重大的军事应用价值。目前军事科技领域尚未有公认的应对措施,现有文献对末敏弹的干扰研究主要为无源干扰,包括箔条云和假目标两种手段^[4-7]。前者通过箔条云衰减、阻断毫米波的传播,降低毫米波辐射计探测目标的能力,使其丢失目标;但箔条云的使用受气候条件、遮蔽场面积、箔条云车载量等因素限制,尤其受风速影响很大。后者采用毫米波假目标作为无源诱饵,对毫米波辐射计实现欺骗干扰,但实际干扰效率受布置方法、气候条件、战术机动使用等条件限制而降低。

针对上述干扰方法的不足,本文提出了一种基于波形诱骗的有源干扰新方法。该方法根据末敏弹毫米波交流辐射计探测金属目标时弹目交会特点和信号处理电路特性,采用毫米波干扰源发射合适功率的干扰信号,使辐射计接收系统获得具有大时宽等幅的天线温度信号。该信号经视频放大器低频截止作用后发生频率失真,输出信号失真为具有正、负脉冲形式的分裂信号,其中负脉冲信号可以模拟探测真实金属目标的输出信号,从而诱骗目标识别器输出起爆信号,实现干扰作用。

1 金属目标天线温度信号分析

当敏感器(毫米波交流辐射计)天线波束扫过金属目标时,利用金属目标与地面背景的毫米波辐射特性差异,天线接收的辐射功率可用天线温度对比度来表示,为一个“钟形”脉冲信号。其中信号峰值和宽度特征反映了目标主要的敏感信息。根据毫米波辐射计探测金属目标的经典理论^[8-10],脉冲信号峰值可用目标位于天线波束中心时引起的天线温度变化量来近似计算,即

$$\Delta T_{A_{\max}} = \Delta T_T \left[1 - \exp \left(- \frac{b A_{TM} \cos^2 \theta_F}{\pi H^2} \right) \right], \quad (1)$$

式中: ΔT_T 为金属目标与地面背景的辐射温度对比度(为一固定负值); A_{TM} 为波束域内目标投影面积; b 为表征天线方向图的常数; H 为探测高度; θ_F 为探测角。

在天线波束中心扫描经过目标的整个过程中,目标响应的脉冲宽度 w_T 可用天线波束尺寸与扫过的目标线性尺寸之和与天线扫描线速度之比来近似表示,即

$$w_T = \frac{D + 2R \sin(\theta_M/2)}{2\pi n H \tan \theta_F}, \quad (2)$$

式中: D 为目标线性尺寸; $R = H/\cos \theta_F$ 为探测距离; θ_M 为天线波束宽度(视场角); n 为天线圆锥扫描转速。

根据(1)式和(2)式所示的信号波形特征参量,可采用高斯拟合函数对天线温度变化量进行波形逼近,以扫描点位于目标中心位置作为时间参考零点时,探测金属目标天线信号温度的拟合函数可表示为

$$f(t) |_{\text{fit}} = \frac{\Delta T_{A_{\max}}}{\Delta T_T} \exp \left[- (2 \sqrt{2 \ln 10} t / w_T)^2 \right], |t| \leq \frac{w_T}{2}. \quad (3)$$

图 1 给出了不同探测高度时获得的天线温度对比度信号波形曲线。由图 1 可见,对于给定探测条件,随着辐射计探测高度不断下降,信号峰值大小($\Delta T_{A_{\max}}/\Delta T_T$)显著增加,信号宽度也随之增大。

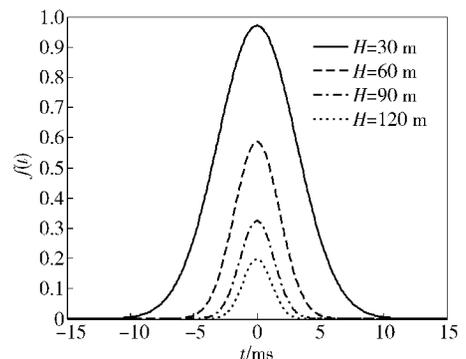


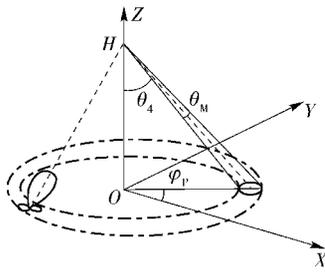
图 1 探测金属目标时天线温度对比度

Fig. 1 The antenna temperature contrast in metal target detection

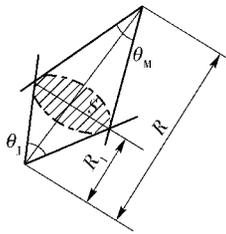
2 毫米波干扰源天线温度信号建模

若将地面金属目标替换为毫米波干扰源,需要

重新分析辐射计扫描过程并进行信号建模。图 2 为辐射计扫描地面毫米波干扰源的示意图。



(a) 圆锥扫描场景
(a) The conical scanning scene



(b) 天线波束交会几何关系
(b) The geometry of antenna beam intersection

图 2 辐射计扫描毫米波干扰源示意图

Fig.2 Schema of the radiometer scanning MMW interference source

考虑到辐射计天线波束中心扫描对准干扰源天线最大增益方向时,接收的干扰源发射功率为最大。此时辐射计和干扰源 2 个波束有最大交叠面 S ,辐射计对于干扰源的探测可近似为对波束中心的圆形面目标 S 的扫描,如图 2 (b) 所示。根据几何关系可得,等效目标 S 的面积

$$A_{TJ} = \pi \left(R_1 \tan \frac{\theta_J}{2} \right)^2, \quad (4)$$

式中: $R_1 = \frac{H}{\cos \theta_F} \tan \frac{\theta_M}{2} / \left(\tan \frac{\theta_M}{2} + \tan \frac{\theta_J}{2} \right)$ 为干扰源到面 S 的距离; θ_J 为干扰源主波束宽度。对于给定的探测条件, θ_M 、 θ_F 和 θ_J 均为定值,等效目标 S 的面积与探测高度的平方成正比,即 $A_{TJ} \propto H^2$ 。因此,不同于辐射计扫描地面金属目标,辐射计扫描干扰源时,随着探测高度变化,其扫描的等效目标尺寸大小会发生变化。将(4)式代入(1)式整理可得,由干扰源引起的天线温度信号峰值为

$$\Delta T_{AJmax} = \Delta T_{TJ} \left[1 - \exp \left(-b \left(\frac{\theta_M \theta_J}{\theta_M + \theta_J} \right)^2 \right) \right], \quad (5)$$

式中 ΔT_{TJ} 用来表征干扰源与地面背景的辐射温度

对比度,可表示为

$$\Delta T_{TJ} = \frac{\eta P_J G_J(\theta', \phi')}{kBR^2} - T_C, \quad (6)$$

其中: P_J 为干扰源发射功率; $G_J(\theta', \phi')$ 为干扰源天线增益方向图; η 为天线接收效率; R 为辐射计天线与干扰源的探测距离; T_C 为背景的辐射温度。

由(5)式可知,通过合理控制干扰源发射功率,使干扰源与地面背景的辐射温度对比度基本恒定,即 ΔT_{TJ} 一定时(为一固定正值),得到的天线温度信号峰值固定不变,与 H 无关。但根据雷达方程,随着 H 的降低,辐射计天线接收到来自干扰源的信号能量应增大,由能量守恒原理可知,其信号宽度将会增大。因此,探测干扰源时将获得一个脉冲宽度较宽的天线温度信号,参考(3)式可将探测干扰源时天线温度信号表示为

$$f(t) |_{is} = \begin{cases} \frac{\Delta T_{AJmax}}{\Delta T_{TJ}} \exp \left[- \left(2 \sqrt{2 \ln 10} \left(t + k \frac{w_T}{2} \right) / w_T \right)^2 \right], & - (1+k) \frac{w_T}{2} \leq t \leq -k \frac{w_T}{2}; \\ \frac{\Delta T_{AJmax}}{\Delta T_{TJ}}, & -k \frac{w_T}{2} \leq t \leq k \frac{w_T}{2}; \\ \frac{\Delta T_{AJmax}}{\Delta T_{TJ}} \exp \left[- \left(2 \sqrt{2 \ln 10} \left(t - k \frac{w_T}{2} \right) / w_T \right)^2 \right], & k \frac{w_T}{2} \leq t \leq (1+k) \frac{w_T}{2}. \end{cases} \quad (7)$$

式中 k 值一般取 2.5 ~ 4。

与相同探测高度下(如 $H = 60$ m)金属目标天线温度信号对比,其波形曲线如图 3 所示。

3 辐射计波形干扰机理

天线接收的辐射功率(天线温度信号)作为辐射计系统输入信号,通过接收机系统进一步信号处理,得到辐射测量的最终输出信号。毫米波交流辐射计接收系统一般由毫米波低噪声放大器、平方律检波器和视频放大器组成^[11-12],其简化的工作原理框图如图 4 所示。

由于接收的辐射能量非常微弱,首先需要经过前级高增益、低噪声的毫米波放大器将射频输入信号放大,达到检波器输入信号的要求;检波器工作于小信号平方律特性,其检波输出的电压信号为

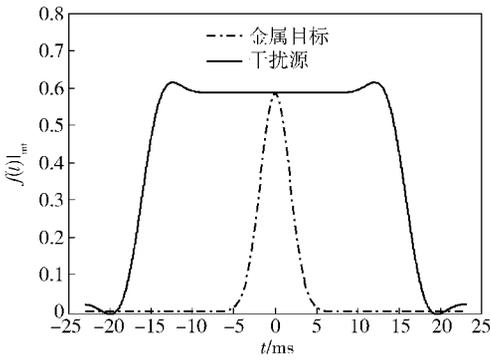


图 3 探测干扰源和金属目标时天线温度对比度

Fig. 3 The antenna temperature contrast in the detection of interference source and metal target

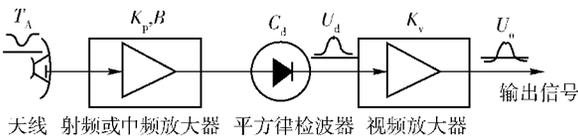


图 4 交流辐射计工作原理框图

Fig. 4 Principle diagram of alternating current radiometer

$$U_d(t) = C_d K_p k B [\Delta T_A(t) + T_e], \quad (8)$$

式中: k 为波尔兹曼常数;接收机系统的等效电气参数分别为平方律检波器功率灵敏度 C_d 、检波前电路的等效带宽 B 、功率增益 K_p 、接收机系统噪声温度 T_e ; $\Delta T_A(t)$ 为天线温度信号 ($\Delta T_A(t) = f(t) |_{m} \Delta T_T$ 或 $\Delta T_A(t) = f(t) |_{is} \Delta T_{TJ}$)。

实际应用中,通常要求毫米波交流辐射计系统开机后立刻进入稳定状态,稳定过程为毫秒量级。检波器与视频放大器之间采用阻容耦合,使本机噪声的平均直流分量不通过视频放大器,只传输有用的交流信号。因此辐射计系统中视频放大器的低频截止频率不为 0,可看作一个有源带通滤波器(通频带一般为 4 ~ 200 Hz),其低频端截止角频率 $\omega_{0L} = \frac{1}{r_i C_e} = \frac{1}{\tau} = 8\pi \text{ rad/s}$ 由阻容耦合电容 C_e 和视频放大器输入阻抗 r_i 决定。当输入视频放大器信号频率低于有源带通滤波器低频端截止频率时,发生频率失真,视频放大器作用于微分运算,则视频放大器输出信号可表示为

$$U_o(t) = U_d(t) \otimes h(t) = K_v e^{-\frac{t}{\tau}} \otimes U_d'(t), \quad (9)$$

式中: $h(t)$ 为视频放大器冲激响应函数; K_v 为视频放大器电压增益; τ 为微分电路时间常数。

对于探测金属目标获得的输入脉冲信号,系统

电路参数设计时保证时间常数 τ 远大于脉冲上升沿和下降沿时间,耦合电容 C_e 只起交流耦合作用,相当于短路。但是,当采用同样的接收机系统处理探测干扰源获得的脉冲信号时,由第 2 节分析可知,其信号等幅展宽,且探测高度越低,脉冲信号宽度越宽,即低频成分越多,使得其信号频率小于带通滤波器低频端截止频率,此时耦合电容 C_e 起微分作用,以时间常数 τ 进行充放电。探测金属目标与探测干扰源时获得的接收机系统输入信号以图 3 所示信号为例,则视频输出信号如图 5 所示。

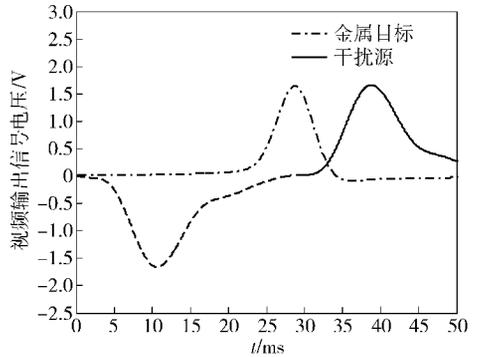


图 5 探测干扰源时视频输出信号

Fig. 5 The video output signal in the interference source detection

从图 5 可看出,对于探测干扰源时获得的等幅宽时天线温度信号,由于辐射计系统中视频放大器固有的低频截止特性,使输入的宽时信号发生频率失真,变为具有正、负脉冲形式的分裂信号,其中右半部分的脉冲信号反向后为实际系统输出信号(因为实际系统中运算放大器为反相放大,且单电源供电,负脉冲部分被切削,故用虚线表示,图中只给出大于零电平信号)。将其与图中经辐射计接收系统线性处理后获得的探测金属目标视频输出信号对比可知,其信号一维波形特征具有较大的相似性。

实际使用时干扰源发射功率的合理控制是实现末敏弹干扰效果的前提,发射功率过小,无法对辐射计产生干扰作用;发射功率过大将导致辐射计系统饱和,产生阻塞效应。已知干扰源发射功率为 P_J , 发射天线增益为 G_J , 当距离干扰源 R 远处的辐射计接收天线主瓣方向在干扰源发射天线主波束范围内时,根据弗里斯传输公式可知,接收天线口面处的功率为

$$P_r = \frac{P_J G_J \lambda^2}{(4\pi R)^2}. \quad (10)$$

为了使干扰源信号到达检波器前的功率满足检波管的小信号平方律要求,即满足检波器动态范围为 $-40 \sim -20$ dBm,以94 GHz($\lambda = 3.2$ mm)直检式交流辐射计为例,其典型的参数为辐射计接收天线增益为33 dB,前端损耗为4 dB,射频放大器增益为58 dB.在末敏弹探测距离为20~120 m范围内,若发射天线增益为 $G_j = 6$ dB,则代入(10)式计算可得,干扰源发射功率的工作范围约为0.04~1.1 mW.

当作用的干扰源发射功率满足上述条件时,能够保证辐射计整个探测过程中会获得展宽约2.5~4倍的等幅宽时信号,从而经后续辐射计系统电路处理后可以产生与探测金属目标时相似的信号波形,将此模拟波形送入判决装置后满足探测金属目标信号特征的判决准则,进而给出引爆信号,实现对末敏弹诱骗干扰作用。

4 实验验证

为验证本文基于波形诱骗的毫米波有源干扰方法的有效性,进行了靶场实际测量。其中毫米波干扰源为一个小型毫米波发射机,主要由干扰源天线,干扰源和控制器组成。辐射计系统样机主要指标参数及实验条件见表1。图6为探测距离60 m时,两次扫过地面金属目标获取的实测信号,图中A位置处对应金属目标。在不改变探测条件前提下,采用毫米波干扰源代替金属目标进行相同的实验,获得的输出信号如图7所示。对比图6和图7可以看出,输出波形B与输出波形A相似,具有相同的目标特征量,从而实现了波形诱骗的干扰效果。

表1 实验样机主要指标参数及实验条件

Tab.1 Parameters of prototype and experimental conditions

名称	参数
射频工作频带/GHz	92~96
灵敏度/K	2.8
积分时间/ms	0.7
天线口径/mm	$\phi 132$
射频或中频模块增益/dB	58
检波器效率/($V \cdot W^{-1}$)	800
视频放大器频带/Hz	4~200
视频放大器增益/dB	62
扫描转速/($r \cdot s^{-1}$)	4
探测高度/m	20~120
金属目标大小/ m^2	3×7

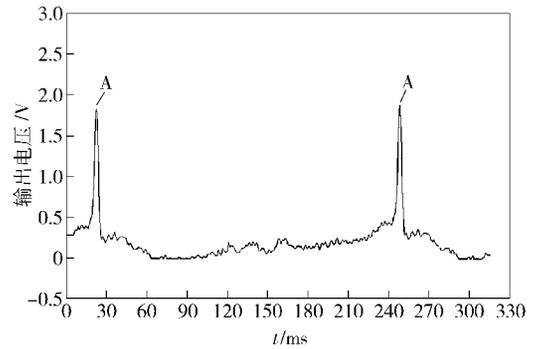


图6 扫描金属目标时辐射计输出的实验波形

Fig.6 Output signal in metal target detection

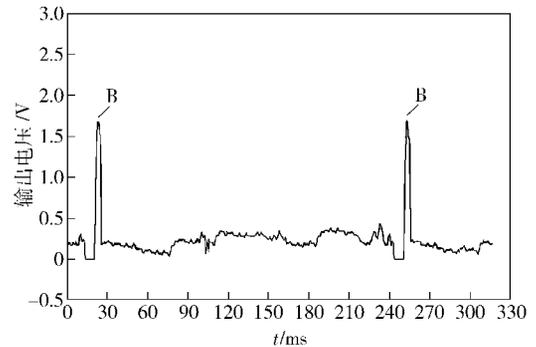


图7 扫描毫米波干扰源时辐射计输出的实验波形

Fig.7 Output signal in MMW interference source detection

5 结论

针对通用型末敏弹毫米波交流辐射计的工作原理和电路特性,提出了一种基于波形模拟的有源干扰新方法,其核心是产生与探测真实金属目标输出信号一维波形特征相似的模拟波形,具体实现是通过控制毫米波干扰源发射功率,获得具有大时宽等幅的天线温度信号送入辐射计接收系统,使视频放大器固有的低频截止特性产生微分作用,输出信号失真为具有正、负脉冲形式的分裂信号,其中负脉冲波形可以模拟金属目标输出信号,从而诱骗末敏弹目标识别器,实现干扰作用,具有热源产生冷目标探测效果的特点。本文在建立探测毫米波干扰源时天线温度信号模型的基础上,分析了干扰方法的作用机理,并通过实际测量实验验证了该方法的可行性和有效性,为末敏弹干扰与抗干扰研究提供了一种理论依据。

参考文献 (References)

- [1] 杨绍卿. 末敏弹系统理论 [M]. 西安:陕西科学技术出版社,

- 2009;1-3.
- YANG Shao-qing. System theory of terminal-sensitive projectile [M]. Xi'an; Shaanxi Science and Technology Press, 2009;1-3. (in Chinese)
- [2] 杨绍卿. 灵巧弹药工程 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010; 21-24.
- YANG Shao-qing. Smart munition engineering [M]. Beijing; National Defense Industry Press, 2010;21-24. (in Chinese)
- [3] 王宏波, 庄志洪, 李运生, 等. 末敏弹引信与战斗部系统的仿真研究 [J]. 兵工学报, 2011, 32(5):532-536.
- WANG Hong-bo, ZHUANG Zhi-hong, LI Yun-sheng, et al. Research on the fuze-warhead system simulation of terminal sensitive munitions [J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(5):532-536. (in Chinese)
- [4] 高东华, 田万顷, 徐庆丰. 箔条幕防御反舰导弹的原理论证与作战仿真研究 [J]. 兵工学报, 2005, 26(3):418-422.
- GAO Dong-hua, TIAN Wan-qing, XU Qing-feng. Study on principle demonstration and fighting simulation of jamming anti-ship missile by chaff screen [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(3):418-422. (in Chinese)
- [5] Sun P L, Cai Q, Tang J, et al. On spreading chaff cloud for countering the terminal guidance missile[C]//IEEE CIE International Conference on Radar. Chengdu, China; IEEE, 2011;845-849.
- [6] Zhou W G, Luo J R, Jia Y G, et al. Performance evaluation of radar and decoy system counteracting antiradiation missile[J]. Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47;2026-2036.
- [7] 薛建国, 巨养锋. 末敏弹干扰诱饵效能评估 [J]. 光电技术应用, 2012, 27(1):12-15.
- XUE Jian-guo, JU Yang-feng. Effectiveness evaluation on decoy for jamming terminal-sensitive projectile [J]. Electro-optic Technology Application, 2012, 27(1):12-15. (in Chinese)
- [8] Kaste O C. The comparison of signal and noise value with measurement value about 35 GHz passive radiometer, AD-A 040366 [R]. US: ASTIA, 1980;16-24.
- [9] 时翔, 娄国伟, 李兴国, 等. 装甲目标毫米波辐射温度的建模与计算 [J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(1):43-46.
- SHI Xiang, LOU Guo-wei, LI Xing-guo, et al. Modelling and calculating of millimeter wave radiant temperature for armored target [J]. J Infrared Millim Waves, 2007, 26(1):43-46. (in Chinese)
- [10] 汪亚玲, 邱燕. 弹载毫米波辐射计仿真系统研究 [J]. 武汉科技大学学报:自然科学版, 2006, 29(3):263-265.
- WANG Ya-ling, QIU Yan. Simulation of millimeter wave radiometer on bomb [J]. J of Wuhan Uni of Sci & Tech; Natural Science Edition, 2006, 29(3):263-265. (in Chinese)
- [11] 钱嵩松, 李兴国. 毫米波交流全功率辐射计的信号恢复处理 [J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(3):350-354.
- QIAN Song-song, LI Xing-guo. Single recovery of AC total power MMW radiometer [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2007, 31(3):350-354. (in Chinese)
- [12] 许建中. 无线电近感系统 [M]. 南京:南京理工大学, 2000; 167.
- XU Jian-zhong. Radio proximity system [M]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2000;167. (in Chinese)