

一种复合调制探测器抗侦察性能分析

荀 阳, 崔占忠, 郝新红

北京理工大学机电工程与控制国防科技重点实验室, 北京 100081

摘要 为了获得伪码调相与线性调频复合调制探测器抗侦察性能, 推导了侦察设备对复合调制信号的侦察作用距离; 利用窗口函数原理, 建立了参数截获概率模型, 给出了参数截获概率随侦察时间变化的数学表达式; 从复合调制信号自相关函数的半主瓣宽度得到了复合调制信号的距离截止特性。结果表明, 由于探测器的近程工作环境, 侦察设备对复合调制探测器的侦察作用距离较小, 复合调制信号的距离截获概率远小于单一线性调频和连续波伪码调相信号, 且具有尖锐的距离截止特性。对比单一调制方式信号, 复合调制信号具有更强的抗截获性能。

关键词 引信探测器; 复合调制; 侦察截获; 欺骗式干扰

中图分类号 TJ434.1

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.28.002

Analysis of Anti-reconnaissance Capability of a New Combined Modulation Detector

XUN Yang, CUI Zhanzhong, HAO Xinhong

National Defense Key Laboratory of Mechatronics Engineering and Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract A novel combined modulation detector with a combined format of Pseudo-Random-Binary-Phase Code (PRBPC) and Linear Frequency Modulation (LFM) is proposed. Its anti-reconnaissance capability is analyzed from three aspects. The reconnaissance distance for the reconnaissance equipment to scout the combined modulation signal is derived; a model of parameter acquisition probability is established with the help of the window function theory; the expression for the probability of intercept parameters is obtained; the distance cut-off feature of the combined modulation signal is achieved by the half-width of the main lobe of the signal autocorrelation function. The combined modulation waveform is compared to the single LFM signal and the single PRBPC signal during the analysis. The computed results of the three aspects for typical parameters show that the combined modulation detector has a quite large reconnaissance distance due to its short-range working environment, the parameter acquisition of the combined modulation signal is very low, and its distance cut-off feature is very incisive. It is concluded that the combined modulation detector enjoys a strong anti-reconnaissance performance.

Keywords fuse detector; combined modulation; reconnaissance interception; deception jamming

0 引言

现代战场条件下, 欺骗式干扰已成为无线电引信的主要威胁之一, 欺骗式干扰对引信实施有效干扰的前提是对引信工作参数的侦收与截获。无线电引信提高抗干扰能力的途径之一是采用复合调制波形, 增加调制信号特征参数, 提高隐蔽性。

伪码调相与线性调频复合调制(简称复合调制)探测器是一种新调制波形的引信探测器^[1], 其发射信号是伪码与线性调频波的复合信号, 由于兼具了伪码调相和线性调频的优

势, 测距精度高于单纯的伪码调相信号, 具有更强的抗干扰能力^[2-4]。本文主要从侦察作用距离、侦察截获概率和距离截止特性 3 方面入手, 对比单一线性调频和连续波伪码调相两种不同发射信号的探测器, 综合分析复合调制探测器的抗侦察性能。

1 复合调制探测器工作原理

复合调制探测器的原理组成如图 1 所示^[1], 产生伪码调相和线性调频波的复合信号 $u(t)$ 通过收发天线辐射出去, 被探

收稿日期: 2011-08-03; 修回日期: 2011-09-23

作者简介: 荀阳, 博士研究生, 研究方向为信息感知与对抗、无线电引信抗干扰技术, 电子信箱: lookingforsun@bit.edu.cn; 崔占忠(通信作者), 教授, 研究方向为中近程目标探测与信号处理, 电子信箱: cuizz@bit.edu.cn

测器前端接收的目标反射回波与本振线性调频信号混频,输出中频信号,然后经信号处理系统进行相关处理后给出启动信号。

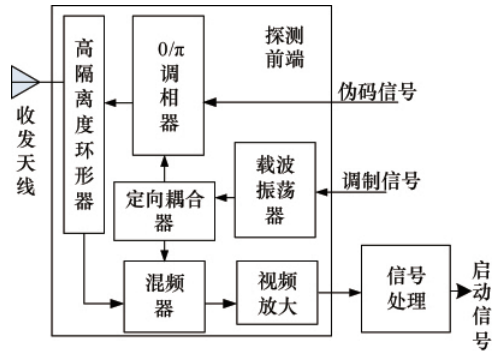


图1 复合调制探测系统原理结构图

Fig. 1 Structure of combined modulation detection system

复合调制探测器的振荡器馈给天线信号的表达式^[1]见式(1),波形如图2所示。

$$u(t)=A_1 m(t) \cos \left[\left(\omega_0 - nKT \right) t + \frac{1}{2} Kt^2 + \frac{n(n+1)}{2} KT^2 \right] \quad (1)$$

其中 $nT \leq t < (n+1)T$, $n=0,1,2,\dots$; A_1 为馈电振幅; K 为调频斜率; T 为调频周期; 伪码信号 $m(t)=1/\sqrt{pT_c} \sum_{k=0}^{p-1} c_k V(t-kT_c)$; c_k 为伪随机序列,其取值为 ± 1 ; $v(t)$ 为 t 在区间 $(0, T_c)$ 时取 1、其他 t 值时取 0 的子脉冲函数; p 为伪码码长; T_c 为伪码码元宽度。

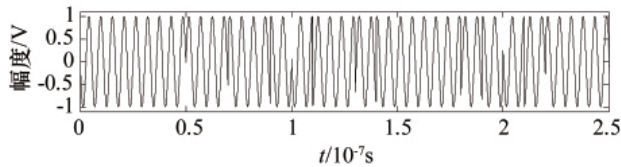


图2 复合调制信号波形

Fig. 2 Waveform of combined modulation

2 侦察作用距离

侦察作用距离代表侦察接收机对探测器信号幅度的检测能力。理论上侦察作用距离越小,引信的抗侦察性能越好,由于引信的近距离工作特点,可以不考虑地球表面曲率对工作在微波频段的引信的直线传播的遮盖作用。假设侦察设备与引信空间位置如图3所示。根据式(1)可知,复合调制探测器振荡器馈给天线的功率为

$$P_1 = A_1^2 / 2 \quad (2)$$

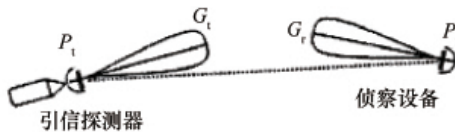


图3 侦察设备与探测器空间位置示意

Fig. 3 Spatial location of scout and detector

到达侦察接收机的前端的引信信号功率 P_r 为^[5]

$$P_r = \frac{P_1 G_t G_r F_t^2(\theta_t) F_r^2(\theta_r) \lambda^2}{(4\pi)^2 10^{0.1L} R^2} \quad (3)$$

其中, G_t 为引信天线增益, $F_t^2(\theta_t)$ 为引信天线在侦察设备天线方向的发射方向性函数, G_r 为侦察设备接收天线增益, $F_r^2(\theta_r)$ 为侦察设备天线在引信天线方向的发射方向性函数, 为引信工作波长, λ 为引信天线与侦察设备天线间的距离, R 为馈线及装置等的总损耗。侦察作用距离 R 为

$$R = \left[\frac{P_1 G_t G_r F_t^2(\theta_t) F_r^2(\theta_r) \lambda^2}{(4\pi)^2 10^{0.1L} P_{\min}} \right]^{1/2} \quad (4)$$

其中, $P_{\min}$ 为干扰机侦察接收的功率灵敏度。若用馈电振幅 A_1 表示, 则有

$$R = \left[\frac{A_1^2 G_t G_r F_t^2(\theta_t) F_r^2(\theta_r) \lambda^2}{32\pi^2 10^{0.1L} P_{\min}} \right]^{1/2} \quad (5)$$

由于探测器的双程工作特点,其在作用距离上具有优势,但由于引信的近距离工作特点,其侦察作用距离仍然较小。若取 $A_1=20V$, $G_t=3dB$, $G_r=10dB$, $\lambda=0.1m$, $L=15dB$, $F_t^2(\theta_t)=F_r^2(\theta_r)=1$, $P_{\min}=-70dB \cdot m$, 计算可得 $R=1318.8m$ 。

通常引信探测器的天线处于空间移动状态,侦察设备要搜索到探测器主瓣的概率较低,且搜索过程需要很长时间,不能满足战术要求。因此需要提高侦察系统灵敏度,实现对旁瓣信号的截获。旁瓣电平是天线的电性能的一项重要指标,为了抗干扰、杂波等需求,要求探测器天线旁瓣尽量低,定义平均旁瓣电平为^[6]

$$G_{ave} = 10 \lg \frac{G_{side}}{G_{main}} \quad (6)$$

其中 G_{side} 为旁瓣拥有的总功率, G_{main} 是总辐射功率,将 G_{ave} 代替式(5)中的 G_t 可得旁瓣侦察时的侦察作用距离,即要达到相同的侦察作用距离,必须使侦察接收机的灵敏度提高 $(G_t - G_{ave})$ 倍。

由于侦察作用距离主要从发射信号的能量角度考虑,一般连续波体制的探测器在相同的发射机条件下具有相同的侦察作用距离,因此复合调制信号相比同参数情况下的单纯线性调频体制和连续波伪码调制体制的探测器没有明显的抗侦察优势。

3 侦察参数截获概率

参数截获概率是在一个多维空间中的几何概率问题,可以采用窗口函数模型描述^[7],如图4所示。

首先将每一个截获条件 i 都转换成一个标准窗口函数 (T_i, τ_i) , 其中 T_i 表示截获条件 i 的平均搜索周期, τ_i 为截获条件 i 的平均窗口宽度,且 $\tau_i \leq T_i, \forall i$ 。假设 n 为多维信号空间中的搜索窗数,每一个窗口函数都是独立、随机工作的,而截获事件则表现为某一时刻 n 个窗口的重叠部分,则参数截获事件的统计概率可按以下表达式分析计算。

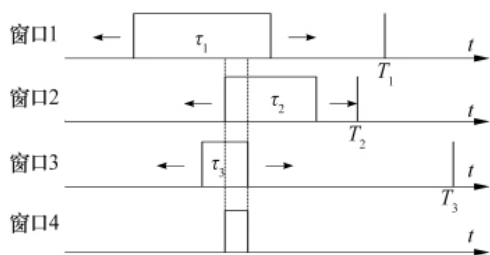


图4 三重搜索窗的重合示意

Fig. 4 Superposition of triple search window

(1) 平均重合宽度 $\bar{\tau}_0$

$$\frac{1}{\bar{\tau}_0} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} \quad (7)$$

(2) 任意时刻重合概率 P_0

$$P_0 = \prod_{i=1}^n \frac{\tau_i}{T_i} \quad (8)$$

(3) 平均重合周期 T_0

$$T_0 = \frac{\bar{\tau}_0}{P_0} = \frac{\prod_{i=1}^n \frac{\tau_i}{T_i}}{\prod_{i=1}^n \frac{1}{T_i}} \quad (9)$$

由于各参数截获事件满足独立性和无后效性,可采用泊松流描述。根据该流的性质,在 T 时间内发生 k 次重合的事件包括:

(1) 在起始时刻发生了一次重合,在后续时间里又发生 $(k-1)$ 次重合;

(2) 在起始时刻未发生重合,在后续时间里发生了 k 次重合。

因此该事件的概率为

$$P(T, k) = P_0 \frac{(T/T_0)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-T/T_0} + (1-P_0) \frac{(T/T_0)^k}{k!} e^{-T/T_0}, T \geq 0, k=1, 2, \dots$$

$$P(T, 0) = (1-P_0) e^{-T/T_0} \quad (10)$$

由于在时间 T 内发生 k 次和 k 次以上的重合都可以满足截获事件,故截获概率为

$$P_k(T) = \sum_{i=k}^{\infty} P(T, i) = 1 - \sum_{i=0}^{k-1} P(T, i) \quad (11)$$

如果只需发生一次重叠即为截获,有 $k=1$,则截获概率为

$$P(T) = 1 - (1-P_0) e^{-T/T_0} \quad (12)$$

对于给定的参数截获概率 $P(T)$,相应的截获时间为

$$T_f = -T_0 \ln[(1-P(T))/(1-P_0)] \quad (13)$$

对复合调制信号侦察截获,主要考虑以下窗口。

(1) 侦察设备方向搜索窗口

$$T_1 = T_s, \quad \tau_1 = T_s(\Delta\theta_s/\theta_s) \quad (14)$$

其中 T_s 为侦察设备天线扫描周期, $\Delta\theta_s$ 为侦察设备天线波束宽度, θ_s 为侦察设备扫描空域。

(2) 探测器方向搜索窗口

根据探测器的工作环境可知引信天线处于固定状态,为

了保证探测器对目标的正确判断,天线波束一般较宽,则可视此窗口为时域全开窗口,此时探测器的方向搜索窗口和搜索周期相同,且均和探测器天线工作时间 T_w 相同:

$$T_2 = T_w, \quad \tau_2 = T_w \quad (15)$$

(3) 频率搜索窗口

$$T_3 = T_f, \quad \tau_3 = T[B_r/(f_2-f_1)] \quad (16)$$

其中, T_f 为侦察设备频率搜索周期, B_r 为侦察设备的射频带宽, (f_2-f_1) 为侦察频率范围,由于线性调频有扫频起始频率 f_s 和扫频终点频率 f_e ,二者独立,所以需要两个频率搜索窗口,而连续波伪随机码信号仅需一个频率搜索窗口。

(4) 线性调频周期搜索窗口

$$T_4 = T_L, \quad \tau_4 = T_L \quad (17)$$

式中 T_L 为线性调频周期,连续波伪随机码信号没有此项窗口。

(5) 码元宽度搜索窗口

$$T_5 = pT_c, \quad \tau_5 = T_c \quad (18)$$

(6) 码元周期搜索窗口

$$T_6 = pT_c, \quad \tau_6 = pT_c \quad (19)$$

(7) 码元幅值搜索窗口

$$T_7 = pT_c, \quad \tau_7 = T_c \quad (20)$$

显然,单一线性调频信号没有伪码参数的三项窗口。因此根据式(7)一式(9)可得天线固定状态下相关参数为

$$\frac{1}{\bar{\tau}_0} = \frac{\theta_s}{T_s \Delta\theta_s} + \frac{1}{T_w} + \frac{2(f_2-f_1)}{T_f B_r} + \frac{1}{T_L} + \frac{1}{pT_c} + \frac{2}{T_c} \quad (21)$$

$$P_0 = \frac{\Delta\theta_s B_r^2}{\theta_s p^2 (f_2-f_1)^2} \quad (22)$$

$$T_0 = \frac{\bar{\tau}_0}{P_0} = \frac{\theta_s p^2 (f_2-f_1)^2}{\Delta\theta_s B_r^2 \left(\frac{\theta_s}{T_s \Delta\theta_s} + \frac{1}{T_w} + \frac{2(f_2-f_1)}{T_f B_r} + \frac{1}{T_L} + \frac{1}{pT_c} + \frac{2}{T_c} \right)} \quad (23)$$

将式(21)一式(23)带入式(12)即可得复合调制信号在两种情况下的参数截获概率。

选取参数 $\theta_s = \theta_a = 360^\circ$, $\Delta\theta_s = 2^\circ$, $T_s = 1s$, $T_f = 1/400s$, $T_w = 3s$, $f_2 - f_1 = 1 \times 10^9 \text{Hz}$, $f_s = 3 \times 10^9 \text{Hz}$, $f_e = 3.03 \times 10^9 \text{Hz}$, $T_L = 15.5 \times 10^{-6}s$, $B_r = 20 \times 10^6 \text{Hz}$, $T_c = 50 \times 10^{-9}s$, $p = 31$,计算两种工作状态下复合调制信号的截获概率,且与相同条件下线性调频信号和连续波伪码调制信号对比如表1所示。结果表明,相比单一调制方式信号,复合调制信号的参数截获概率明显较低。

表1 天线固定情况下参数截获概率

Table 1 Interception probability of parameters the when antenna is fixed

t/s	0.5	1	2	3
$P_{\text{PRBFC-LFM}}$	0.0460	0.0899	0.1718	0.2462
P_{PRBFC}	0.9047	0.9909	0.9999	1.0000
P_{LFM}	0.9970	1.0000	1.0000	1.0000

4 距离截止特性

尖锐的距离截止特性能消除预定距离外的背景干扰和欺骗式干扰。信号的距离截止特性是由信号距离自相关函数

的主瓣宽度来表征的。根据复合调制信号的模糊函数^[1],其距离自相关函数相关峰的半主瓣宽度为

$$\tau_{\text{PN-LFM}} = \frac{T_c}{\sqrt{(B \cdot T_c) + 1}} \quad (24)$$

式(24)说明复合调制信号的距离截止特性决定于调制带宽 B 和伪码码元宽度 T_c ,而与伪码码长 p 无关。伪码调相信号自相关函数^[9]的半主瓣宽度为 T_c ,线性调频信号^[9]自相关函数的半主瓣宽度为 $1/B$ 。

当第3节相同参数条件下,复合调制信号的半主瓣宽度为 27.73ns、伪码调相信号的半主瓣宽度为 50ns、线性调频的半主瓣宽度为 33.3ns,对比可知,复合调制信号具有最优距离截止特性,抗欺骗模拟能力最强。

5 结论

本文从侦察作用距离、侦察截获概率和距离截止特性3方面入手,对比同类单一调制发射信号的探测器综合分析复合调制探测器的抗侦察能力,得到以下结论。

(1) 仅看侦察作用距离,侦察设备对连续波无线电探测器具有相同侦察作用距离,复合调制探测器没有明显优势,但由于引信探测器的近距工作条件,对其侦察作用距离仍然较小。

(2) 复合调制信号具有更加复杂的调制方式,对侦察接收设备提出了更高要求,且在侦察条件能满足要求的同等侦察水平下,复合调制信号参数截获概率远低于同类单一调制方式信号。

(3) 在相同的参数下,复合调制信号较单一调相或调频信号具有更窄的主瓣宽度,具有尖锐的距离截止特性,加大了欺骗式干扰转发或模拟的难度。

复合调制信号比同类单一调制信号具有更强的抗侦察能力,其抗欺骗式干扰的能力更强。

参考文献 (References)

- [1] 郝新红. 复合调制引信定距理论与方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006.
Hao Xinhong. Research on ranging theory and method of radio fuze based on combining LFM with PRBP modulation [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006.
- [2] 殷国平, 曹旭平, 崔占忠. 伪码调相与线性调频复合调制信号探测性能研究[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(2): 280-282.
Yin Guoping, Cao Xuping, Cui Zhanzhong. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(2): 280-282.
- [3] 殷国平, 曹旭平, 崔占忠. 伪码调相与线性调频复合调制引信抗干扰及多普勒容限性能研究[J]. 探测与控制学报, 2006, 28(3): 35-38.
Yin Guoping, Cao Xuping, Cui Zhanzhong. Journal of Detection & Control, 2006, 28(3): 35-38.
- [4] 郝新红, 白钰鹏, 崔占忠. 一种复合调制波形的测距性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(4): 297-301.
Hao Xinhong, Bai Yupeng, Cui Zhanzhong. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(4): 297-301.
- [5] 谢晓霞. 侦察截获仿真分析[J]. 雷达与对抗, 1998(3): 30-33.
Xie Xiaoxia. Radar & Ecm, 1998(3): 30-33.
- [6] 林象平. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1995.
Lin Xiangping. The principle of radar countermeasures[M]. Xi'an: Northwest Telecommunication Engineering College Press, 1995.
- [7] 栗苹, 赵国庆, 杨小牛, 等. 信息对抗技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
Li Ping, Zhao Guoqing, Yang Xiaoniu, et al. Information countermeasure technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [8] 肖国振. 伪随机序列及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
Xiao Guozhen. Pseudo-random sequence and its application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990.
- [9] 林茂庸. 信号理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995.
Lin Maoyong. Signal theory and applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1995.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·

“第七届冶金与材料电磁过程国际会议”征文



由中国金属学会主办的“第七届冶金与材料电磁过程国际会议”拟于 2012 年 10 月 22 日在北京召开。

征文范围: 冶金与材料电磁过程的基础理论; 冶金与材料电磁过程的数值模拟; 磁流体力学和流体流动控制; 电磁场在炼铁炼钢过程中的应用; 电磁连铸技术(电磁搅拌、电磁制动等); 凝固过程与固态相变的电磁场调控; 脉冲电磁成形技术; 强磁场材料科学; 电磁感应加热、熔炼与热处理; 冶金与材料制备过程的电磁测量与设备; 微波处理工艺; 电化学工艺; 等离子技术及应用; 资源与废弃物的电磁处理; 电磁场在冶金与材料制备过程的其他应用。

摘要截止日期: 2011 年 11 月 30 日。

论文截止日期: 2012 年 4 月 30 日。

电 话: 024-83682417。

电子信箱: epm2012@csn.org.cn。

大会网站: http://www.csm.org.cn/news/show_news.aspx?newsId=5141。