

Fundamentals and  
Methodology of  
Radio Fuze

无线电引信设计  
原理与方法

赵惠昌 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 无线电引信设计原理与方法

## Fundamentals and Methodology of Radio Fuze

赵惠昌 著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

无线电引信设计原理与方法/赵惠昌著. —北京:国防工业出版社,2012.3

ISBN 978-7-118-07968-5

I. ①无... II. ①赵... III. ①无线电引信—设计  
IV. ①TJ430.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 020483 号

※

**国防工业出版社** 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 17 字数 289 千字

2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 120.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金**  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	宋家树	蔡 镭	程洪彬	
秘 书 长	程洪彬			
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

# 序

无线电引信是世界上最早研制成功并投入实战的近炸引信,也是迄今为止世界各国装备量最多、应用最为广泛的近炸引信。随着射频探测技术、信号处理技术和微电子技术的蓬勃发展,60多年来无线电引信的发展方兴未艾,新工作体制的无线电引信不断涌现,并在陆、海、空各类弹药中得到广泛应用,显著提高了武器系统对目标的终端毁伤效能。

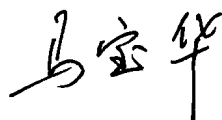
无线电引信的近程动态射频测速测距技术特征,也在汽车防撞雷达等民用领域得到广泛应用。不论是高等学校或工程技术界,都十分需要专门论述无线电引信工作原理与设计规律的书籍。赵惠昌教授编著的《无线电引信设计原理与方法》,正是满足了这一需求。该书具有三个鲜明特色:

第一,论述领域的专门性。该书专门论述近炸引信的一个主要门类——无线电引信的工作原理、数学过程、仿真规律和设计方法。书中既对各类无线电引信有全面的介绍,又对应用最广泛的无线电引信如连续波多普勒、连续波调频、连续波伪随机码调相、脉冲多普勒等工作体制的无线电引信有系统深入的论述。这在国内外相近书籍中尚不多见。

第二,论述内容的新颖性。该书集中反映了赵惠昌教授长期从事无线电引信教学和科学研究工作的经验及研究成果,同时也反映了国内外同行在这一领域的研究成果。如伪随机码调相与伪随机脉位复合、伪随机码调相与正弦调频复合等复合体制无线电引信、以及超宽带等特殊工作体制无线电引信的工作原理与设计方法。反映了无线电引信发展的前沿技术。

第三,论述内容的系统性和实用性。该书对每一大类无线电引信,首先讲述它们的基本工作原理、物理过程和数学描述等共同性问题,然后再按具体工作体制讲述其参数选择、性能分析、系统仿真和实现方法等个性问题。全书层次清晰、逻辑性强。该书对无线电引信的工程设计具有重要的指导作用,可作为高等学校相关专业的教材或主要参考书。

我与赵惠昌教授有着多年的学术交往,他的学术研究的专注精神、实事求是的科学精神和教书育人的奉献精神,给我留下非常深刻的印象。在他的这一专著付梓出版之际,特作此序以志庆贺,相信这本书将对我国无线电引信技术与装备的发展起到重要的理论支撑和技术推动作用。

Handwritten signature of Ma Baohua in black ink, consisting of three characters: '马宝华'.

2011年4月25日于北京



# 前 言

我国是一个地域大国,有着辽阔的疆域,同时,我国还是个发展中国家,近年来国民经济正处于高速发展阶段,为了保持国家经济社会长期稳定的发展,必须以一个强大的国防力量作后盾。引信作为武器系统的终端毁伤控制器,对武器系统的毁伤效能有着关键性的影响。一个好的终端毁伤控制器——引信,能够使武器系统最大限度地发挥其对目标的最终毁伤效能。

无线电引信是利用目标电磁散射特性对目标进行探测,对弹药实施起爆控制的一种特殊装置。不同体制的无线电引信对目标的探测能力和抗干扰能力(包括抗人工有源干扰)是不一样的,其复杂程度也大相径庭。当前,无线电引信技术已经渗透到航天、航空、兵器、防化等各军事领域,现代信息化战争对无线电引信提出了更高的要求。引信科研、生产相关人员对无线电引信的新原理、新概念、新体制迫切需要了解。同时,引信探测技术在民用领域也有大量的应用场所,如高速公路汽车防撞、测速测距、机场安检等。

二十多年来,作者一直从事无线电引信相关的教学、科研和实验工作,对无线电引信相关理论有了比较深刻的认识,积累了一些心得和体会,愿以此书与引信界同行、读者进行交流。本书的主要内容融入了作者多年的教学与科研成果,包括发表的学术论文、研究报告、技术总结和指导博士后研究生、博士研究生、硕士研究生的研究工作,同时增加了近年来国内外陆续涌现的有关无线电引信的一些新概念、新体制。书中将主动式无线电引信按照连续波体制、脉冲体制和特殊体制三个大类进行分类编排,从工程应用角度出发,在理论和仿真试验两个方面对不同体制无线电引信的工作原理、数学过程以及系统仿真设计方法进行充分的论述。其论述思路是:原理性介绍—数学推导—信号频域时域分析—信号处理及系统仿真一部分设计举例等。除详细的数学推理外,增加了大篇幅的先进的引信系统仿真设计内容。

全书共分三篇 12 章:第一篇连续波体制引信,第 1 章为概述,简述了引信系统的一般性概念。第 2 章至第 6 章论述了连续波体制无线电引信工作原理、设

计、仿真方法;第二篇脉冲体制无线电引信,第7章至第9章论述了脉冲体制无线电引信工作原理、设计、仿真方法;第三篇特殊体制无线电引信,第10章至第12章论述了三种特殊体制无线电引信的工作原理、设计方法。

本书主要针对无线电引信探测器展开讨论,重点论述无线电引信的基础理论、工作机理、数学关系推演,以及由此引出的一些新的设计思想,并详细讨论现代无线电引信的先进的仿真设计方法。与引信总体设计有关的,如毁伤概率、引战配合、抗干扰措施、引信的可靠性及引信安全系统和结构设计等问题不包含在本书内容范围。

本书对学习无线电引信的基础理论知识和工程应用技术有较好的参考价值,书中介绍的先进的引信系统仿真设计方法具有工程应用指导意义。本书可作为从事雷达,特别是无线电引信及其电子对抗研究的国防科技人员和近程目标探测,如汽车防撞、测距测速等相关科技、开发人员参考用书,亦可作为大专院校相关专业的教学用书。

本书的编写得益于作者的众多研究生们所做的研究工作,尤其是周新刚博士、刘静博士、李鑫硕士、孙新年硕士,博士后熊刚、王李军,博士胡泽宾、邓建平、张淑宁、刘己斌、黄光明、李明孜、涂友超,硕士任哪、夏彪、杜敏、吴建伟、刘佳、尚浩强、刘源、耿琦、夏冠云、龚威、顾建飞、徐元银、稽华、陈宇玉等。在此,向他们(她)们致以诚挚的谢意!

曾任总装备部科技委兼职委员、北京理工大学首席专家的马宝华教授审阅了书稿,并欣然为本书作序;北京理工大学著名引信专家崔占忠教授、南京理工大学著名引信专家李兴国教授分别审查了全部书稿内容,提出了许多指导性意见和建议,作者据此对原稿进行了重要改动;北京宏动科技有限公司吴燕良总工程师对第11章超宽带无线电引信进行了专项审查,并提出了许多宝贵的修改意见。在此,向他们深表敬意并致以诚挚的谢意!

感谢在本书编写过程中给予指导和帮助的中国人民解放军理工大学沈越泓教授、北京理工大学栗萍教授!

感谢南京理工大学张淑宁副研究员,她为本书原稿中的图表、公式、文字等校对做了大量细致的工作,付出了辛勤的劳动!

本书获得国防科技图书出版基金的资助,在此,对基金委专家的评审和指导及国防工业出版社相关工作人员为本书的出版所付出的辛勤劳动表示感谢!

本书在编写过程中,参考了大量国内外文献资料,在此,对原作者表示衷心的感谢!

由于作者理论和技术水平有限,加之内容广泛,有些新引信、新技术甚至尚在发展完善中,书中一些观点仅是一家之言,难免有错误和不妥之处,诚挚希望引信界专家、同行和读者批评指正。

作者  
2011年4月

# 目 录

## 第一篇 连续波体制无线电引信

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 引信的定义及其分类 .....	1
1.2 无线电引信的基本构成及一般性概念 .....	3
1.2.1 发火控制装置 .....	3
1.2.2 爆炸序列 .....	5
1.2.3 安全系统 .....	6
1.2.4 能源装置 .....	7
1.3 无线电引信的工作过程 .....	7
1.4 无线电引信的目标散射特性 .....	9
1.5 无线电引信的主要战术技术要求 .....	12
1.6 无线电引信的设计考虑 .....	16
1.7 无线电引信的研究概况及发展趋势简介 .....	16
<b>第 2 章 连续波多普勒体制无线电引信</b> .....	19
2.1 连续波多普勒体制无线电引信原理 .....	19
2.2 对空中目标引信信号分析 .....	21
2.3 对地面目标引信信号分析 .....	23
2.4 自差式收发机引信和外差式收发机引信 .....	25
2.4.1 自差式收发机引信 .....	25
2.4.2 外差式收发机引信 .....	28
2.5 一种获取准最佳炸高的信号处理方法 .....	31
2.6 跳频式无线电引信 .....	33
2.6.1 概述 .....	33
2.6.2 跳频式无线电引信工作原理 .....	33
<b>第 3 章 连续波调频体制无线电引信</b> .....	35
3.1 三角波线性调频引信 .....	36

3.1.1	三角波线性调频信号表达式及其波形	36
3.1.2	三角波线性调频定距原理	37
3.1.3	三角波线性调频差频信号分析	39
3.1.4	三角波线性调频信号模糊函数及相关函数	46
3.1.5	三角波线性调频引信参数选择原则	52
3.2	三角波线性调频多普勒引信	55
3.2.1	三角波线性调频多普勒引信定距原理	55
3.2.2	三角波线性调频多普勒引信主要参数的选择	56
3.2.3	三角波线性调频多普勒引信设计举例	56
3.2.4	三角波线性调频多普勒引信系统仿真	58
3.3	锯齿波线性调频引信	62
3.3.1	锯齿波线性调频定距原理	62
3.3.2	锯齿波线性调频差频信号分析	65
3.3.3	锯齿波线性调频信号模糊函数及相关函数	69
3.4	锯齿波线性调频多普勒引信	73
3.4.1	锯齿波线性调频多普勒引信定距原理	73
3.4.2	锯齿波线性调频多普勒引信系统仿真	75
3.5	正弦波调频引信	77
3.5.1	正弦波调频的差频与弹目距离的关系	77
3.5.2	正弦波调频的差频信号分析	79
3.5.3	多普勒效应对差频信号的影响	83
3.5.4	正弦波调频多普勒引信实现方法	85
3.5.5	正弦波调频多普勒引信参数选择	86
3.5.6	正弦波调频多普勒引信系统仿真	87
3.6	恒定差频测距引信	91
<b>第4章</b>	<b>连续波伪随机码调相体制无线电引信</b>	<b>94</b>
4.1	伪随机码调相引信工作原理	95
4.2	伪随机码调相信号的模糊函数	96
4.2.1	伪随机码调相信号单周期模糊函数及其特征	97
4.2.2	伪随机码调相信号单周期模糊函数切割	99
4.2.3	伪随机码调相信号周期模糊函数及其自相关函数	101
4.3	伪随机码调相信号的功率谱	102

4.4	伪随机码调相引信信号分析 .....	103
4.5	伪随机码调相引信性能及伪随机码参数选择 .....	106
4.5.1	伪随机码调相引信性能分析 .....	106
4.5.2	伪随机码参数选择 .....	108
4.6	伪随机码调相引信系统仿真 .....	109
4.7	伪随机码调相引信实现方法举例 .....	112
<b>第5章</b>	<b>伪随机码调相连续波调频复合体制无线电引信 .....</b>	<b>115</b>
5.1	伪随机码调相与正弦调频复合体制引信 .....	115
5.1.1	伪随机码调相与正弦调频复合引信工作原理 .....	116
5.1.2	伪随机码调相与正弦调频复合引信信号分析 .....	117
5.1.3	伪随机码调相与正弦调频复合信号模糊函数 .....	121
5.1.4	伪随机码调相与正弦调频复合引信系统仿真 .....	123
5.2	伪随机码调相与线性调频复合体制引信 .....	128
5.2.1	伪随机码调相与线性调频复合引信工作原理及信号分析 .....	128
5.2.2	伪随机码调相与线性调频复合引信性能及参数选择 .....	133
5.2.3	伪随机码调相与线性调频复合引信仿真 .....	135
<b>第6章</b>	<b>比相引信 .....</b>	<b>137</b>
6.1	比相引信的基本工作原理 .....	137
6.2	调幅比相引信 .....	141
6.3	调频比相引信 .....	144

## 第二篇 脉冲体制无线电引信

<b>第7章</b>	<b>脉冲无线电引信 .....</b>	<b>147</b>
7.1	脉冲信号的模糊函数 .....	147
7.1.1	脉冲信号模糊函数的定义 .....	147
7.1.2	单载频矩形脉冲信号的模糊函数 .....	148
7.2	脉冲测距引信 .....	150
7.2.1	直接检波式脉冲引信工作原理 .....	151
7.2.2	直接检波式脉冲引信参数选择 .....	152
7.3	脉冲多普勒引信 .....	153
7.3.1	脉冲对脉冲相干检测的脉冲多普勒引信 .....	154

10.3 反相关噪声引信.....	209
<b>第 11 章 超宽带无线电引信 .....</b>	<b>213</b>
11.1 超宽带雷达信号理论基础.....	215
11.1.1 超宽带雷达信号模型 .....	215
11.1.2 超宽带雷达距离方程 .....	216
11.1.3 超宽带信号波形 .....	218
11.1.4 超宽带信号的调制方式 .....	221
11.2 超宽带引信工作原理.....	223
11.3 超宽带引信接收系统仿真.....	225
11.4 对地超宽带引信设计举例.....	233
<b>第 12 章 谐波无线电引信.....</b>	<b>237</b>
12.1 谐波雷达的工作机理.....	237
12.2 谐波雷达距离方程.....	240
12.3 谐波无线电引信工作原理.....	242
<b>参考文献 .....</b>	<b>244</b>

# Contents

## PART I CONTINUOUS WAVE TYPE RADIO FUZES

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
1.1 Definition and types of fuzes .....	1
1.2 Basic components and concepts of radio fuzes .....	3
1.2.1 Firing device .....	3
1.2.2 Explosive train .....	5
1.2.3 Safety device .....	6
1.2.4 Power source .....	7
1.3 Operation processes of radio fuze .....	7
1.4 Target scattering properties of radio fuzes .....	9
1.5 The main tactical and technical requirements of radio fuze .....	12
1.6 Design considerations of radio fuze .....	16
1.7 The overview of current research and development trend of radio fuze .....	16
<b>Chapter 2 Continuous wave Doppler radio fuze</b> .....	19
2.1 Principles of CW Doppler fuze .....	19
2.2 Signal analysis for air target fuze .....	21
2.3 Signal analysis for surface target fuze .....	23
2.4 Autodyne radio fuze and heterodyne radio fuze .....	25
2.4.1 The autodyne radio fuze .....	25
2.4.2 The heterodyne radio fuze .....	28
2.5 A signal processing method to achieve optimal burst height .....	31



2.6	Frequency-hopped radio fuze	33
2.6.1	Introduction	33
2.6.2	Operation principles of Frequency-hopped radio fuze	33
<b>Chapter 3</b>	<b>Continuous Wave FM radio fuze</b>	<b>35</b>
3.1	Triangular linear FM fuze	36
3.1.1	Expression and Waveform of Triangular linear FM signal	36
3.1.2	Ranging principles of Triangular Linear FM	37
3.1.3	The difference frequency signal analysis for Triangular Linear FM fuze	39
3.1.4	Ambiguity function and correlation function of Triangular Linear FM signal	46
3.1.5	Parameters selection principle of Triangular Linear FM fuze	52
3.2	Triangular Linear FM Doppler fuzes	55
3.2.1	Ranging principles of Triangular Linear FM Doppler fuze	55
3.2.2	The main parameters selection of Triangular Linear FM Doppler fuze	56
3.2.3	Design examples of Triangular Linear FM Doppler fuze	56
3.2.4	System simulations of Triangular Linear FM Doppler fuze	58
3.3	Sawtooth Linear FM fuze	62
3.3.1	Ranging principles of Sawtooth Linear FM	62
3.3.2	The difference frequency signal analysis for Sawtooth Linear FM fuze	65
3.3.3	Ambiguity function and correlation function of Sawtooth Linear FM signal	69
3.4	Sawtooth Linear FM Doppler fuze	73
3.4.1	Ranging principle of Sawtooth Linear FM Doppler fuze	73
3.4.2	System simulations of Sawtooth Linear FM Doppler fuze	75
3.5	Sinusoidal FM fuze	77
3.5.1	Relationship between the difference frequency and the fuze-target relative distance	77
3.5.2	The difference frequency signal analysis for Sinusoidal	