



装备科技特等出版基金

超宽带 电磁辐射技术

[俄] В. И. 科舍廖夫 В. П. 别里钦科 Ю. И. 布扬诺夫 著

李国政 译



国防工业出版社

NATIONAL DEFENSE INDUSTRY PRESS



装备科技译著出版基金

超宽带电磁辐射技术

[俄] В. И. 科舍廖夫 В. П. 别里钦科

Ю. И. 布扬诺夫 著

李国政 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2016-112 号

图书在版编目(CIP)数据

超宽带电磁辐射技术 / (俄罗斯) 科舍廖夫, (俄罗斯) 别里钦科, (俄罗斯) 布扬诺夫著; 李国政译. —北京: 国防工业出版社, 2018. 9

ISBN 978-7-118-11650-2

I. ①超… II. ①科… ②别… ③布… ④李…
III. ①超宽带天线-电磁辐射-研究 IV. ①TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 208067 号

本书简体中文版由 В. И. Кошелев, В. П. Беличенко,
Ю. И. Буянов 授予国防工业出版社独家出版发行。
版权所有, 侵权必究。

※

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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 28 $\frac{3}{4}$ 字数 581 千字

2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1-2000 册 定价 159.00 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

译者序

本书是俄罗斯三名学者 В. И. 科舍廖夫、В. П. 别里钦科和 Ю. И. 布扬诺夫撰写的关于超宽带电磁辐射技术的一部专著。从 20 世纪 90 年代初以来,作者所在的俄罗斯科学院西伯利亚分院强流电子学研究所和托木斯克国立大学无线电物理系组成的科研集体,在超宽带无线电脉冲技术领域实际装置研制和理论模拟,尤其在天线阵列技术方面,开展了系统的研究工作,取得了很大进展。本书就是他们的研究和研制工作的总结,其中包括一些原创性成果。

本书俄文版名为 СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ,经与原书主编 В. И. 科舍廖夫教授商量,该书中文版更名为《超宽带电磁辐射技术》。此外,还征得 В. И. 科舍廖夫教授同意,将书中符号表、缩略语分别作为附录 1、附录 2 列在全书第 12 章后。在本书翻译完成后,原书主编 В. И. 科舍廖夫教授于 2016 年 12 月 28 日来函,对该书第 2~5 章、第 7 章、第 9~10 章中发现的问题给出了修改意见,这些在本书中相应页脚处以页末注形式标明。

本书在前 8 章中首先阐述了超宽带脉冲无线电技术发展及其应用的历史,接着介绍了超宽带脉冲定义和特性,描述了非稳态过程的电动力学问题及其求解方法即解析方法、解析-数值方法、数值方法以及小波分析方法,以及将这些方法应用于超宽带脉冲的发射和接收、超宽带脉冲在导电和介电目标上以及通道中的传输和散射问题等,包括脉冲信号在散射目标和传输通道的脉冲响应、原脉冲重建等。在后 4 章中给出了读者更感兴趣的天线和天线阵列以及利用行波叠加方法对发射和接收天线脉冲响应的研究等,归纳了对有源接收天线和双极天线阵列、利用向量接收天线对辐射和目标散射的超宽带脉冲极化结构的研究结果,并特别关注了组合天线和天线阵列以及兆伏有效辐射势的高功率超宽带辐射源。在最后一章给出了 2×2 、 4×4 、 8×8 单元阵列辐射源的研究结果,实现了辐射的方向可控、频谱可控。此外,各章都罗列了该领域(俄罗斯)国内外公开发表的参考文献。基于前述可见,本书反映了俄罗斯这一领域当今的概况和水平。因此,本书的翻译出版,对于我国在相关技术领域从事研究和研制的科技研究人员大有裨益,是值得借鉴和参考的重要资料。

大家知道,无线电技术、电磁场技术、微波技术,乃至本书阐述的超宽带技术,它们在学科和专业技术上是相近的,其基础都是著名的麦克斯韦方程组。这一领域科学技术虽然早在 19 世纪末就开始了,但是直到核武器出现以后,随

着核爆炸电磁脉冲(ЭМИ ЯВ)模拟器的研究和研制得到了很大的发展,然而从20世纪90年代初以来,超宽带科学和技术及其在不同方面的应用才更得到了蓬勃发展,这其中包括超宽带雷达、超宽带无线电通信等以及它们的基础技术:天线、天线阵列和高功率超宽带辐射源技术,概括地讲就是它们的军用、民用甚至反恐应用等。

因此,本书有益于从事超宽带电磁脉冲的产生、辐射、传播和接收及其应用领域专家和科技研究人员,以及高等院校相关专业和研究方向的教师、研究生等。

本书译者有幸得到俄罗斯强流电子学研究所 В. И. 科舍廖夫教授和托木斯克国立大学 В. П. 别里钦科教授、Ю. И. 布扬诺夫教授授权翻译并协助出版本书的中文版。

本书的翻译出版得到了许多同志和朋友的支持和帮助,首先感谢邱爱慈院士、段宝岩院士支持推荐本书的出版。谢彦召教授和范亚军研究员作为这一领域从事研究的专家,在得知将要翻译出版这一专著时,表示了很大的兴趣和支持。感谢谢彦召教授在出版和翻译过程中给予的帮助,审阅了部分书稿。感谢潘妮妮女士在译稿计算机录入中所做的大量工作。除此之外,还要感谢 Ю. А. 安德列耶夫博士在西安时对本书某些原文翻译的帮助。

最后,还要感谢国防工业出版社和牛旭东责任编辑的大力支持和帮助,没有他们的努力,本书的出版也是困难的。

本书的翻译是应西安交通大学特种电气技术教育部重点实验室和瞬态电磁环境与应用国际联合研究中心的需要完成的。

由于译者水平所限,译文不当之处在所难免,敬请批评指正。

译者谨记

2017.11, 西安

作者引言

从 20 世纪 90 年代初开始,对超宽带无线电系统即高功率电磁脉冲辐射源,展开了密集强化的研究。与此同时,俄罗斯科学院西伯利亚分院强流电子学研究所与托木斯克国立大学无线电物理系组成的科研集体,在这一领域开展了系统的研究工作。

在过去的 20 多年中,本书作者作为上述两个单位联合科研集体的主要参与者,在这一极其非稳态过程物理领域的研究中获得了许多新的认知,在研究和研制发射天线、接收天线、天线阵列和高功率超宽带电磁辐射源的工作中积累了丰富的经验。本书作者在本专著中涉猎非常广泛的研究领域,包括雷达定位和许多目标的电子系统对短电磁脉冲作用的敏感度问题。基于这种情况,作者最初曾打算,本书的阐述只限于作者科研集体得到的原创性结果。

然而,对这些结果表述的逻辑本身,却使作者相信:更广泛地讨论和研究超宽带无线电系统,即高功率电磁脉冲辐射源的现代状况和水平是十分必要的。因此,本专著把非常大的注意力集中到非稳态电动力学诸多问题上,而问题的求解方法涉及解析方法、解析-数值方法和数值方法,以及将这些方法应用于超宽带脉冲的发射和接收问题及在介质和通道中的传播、在导电和介电目标上的散射问题等。当然,对本书材料的选取造成影响的,应当提到的还有作者的科学兴趣。

作者感到非常高兴的是,能够借助本书出版的机会,对本科研集体同事们在研究过程不同阶段中富有成效的合作表示深深的谢意。

目 录

第 1 章 超宽带脉冲无线电系统引言	1
1.1 超宽带无线电系统的发展历史	2
1.2 超宽带雷达	8
1.2.1 雷达目标的探测	10
1.2.2 雷达目标的识别	16
1.3 超宽带通信系统	23
1.3.1 单带超宽带通信	23
1.3.2 多带超宽带通信	24
1.3.3 超宽带直接无规则通信	25
1.4 电子系统对超宽带电磁脉冲作用的敏感度	25
小结	28
问题和检测试题	28
参考文献	28
第 2 章 超宽带脉冲的定义和特性	37
引言	37
2.1 基本定义	37
2.2 电脉冲参数	38
2.3 超宽带辐射脉冲的特性	39
2.4 脉冲电磁辐射的表达形式	41
2.4.1 时间表达	41
2.4.2 频谱表达	44
2.4.3 通过指数函数的表达	47
2.4.4 小波分析	48
小结	51
问题和检测试题	52
参考文献	53
第 3 章 非稳态过程电动力学的基本原理	55
引言	55
3.1 麦克斯韦方程和波方程	55

3.2	能量平衡方程和麦克斯韦方程解的单值性	58
3.3	电动力学势	60
3.4	洛伦兹型综合辅助定理	62
3.5	互易性定理	63
3.6	非稳态过程电动力学的边界问题	67
	小结	69
	问题和检测试题	70
	参考文献	70
第4章	非稳态过程电动力学边界问题的求解方法	73
	引言	73
4.1	严格的解析方法和解析-数值方法	73
4.1.1	黎曼方法	74
4.1.2	在电动力学内部和外部问题中采用的渐近方法	77
4.1.3	非稳态波导方程方法	78
4.2	空间-时间积分方程方法	79
4.2.1	基本方程	79
4.2.2	远区场的计算	82
4.3	有限差分法	83
	小结	89
	问题和检测试题	89
	参考文献	89
第5章	超宽带脉冲辐射	96
	引言	96
5.1	超宽带脉冲辐射的基础源	97
5.1.1	电赫兹偶极子	97
5.1.2	缝隙辐射器	100
5.1.3	磁赫兹偶极子	100
5.2	有限尺寸超宽带脉冲辐射器的场	101
5.2.1	环状源的辐射	101
5.2.2	盘状源和圆孔源的辐射	105
5.3	超宽带辐射器场的结构	108
5.3.1	短辐射器场的区域边界	108
5.3.2	孔径辐射器场的区域边界	114
5.4	电磁脉冲辐射的效率	115
5.4.1	方向图	115

5.4.2 辐射器的能量、峰值功率和峰值场强效率	117
小结	118
问题和检测试题	119
参考文献	120
第6章 超宽带脉冲的传播	123
引言	123
6.1 超宽带电磁脉冲在导电介质中的传播	124
6.1.1 超宽带电磁脉冲在无限介质中的传播	124
6.1.2 超宽带脉冲在地球大气中的传播	131
6.1.3 高功率脉冲在低层地球大气中的畸变	135
6.2 超宽带脉冲在平面层介质中的传播	140
6.2.1 超宽带脉冲穿过两介质界面	140
6.2.2 脉冲辐射穿过均匀平面平行层	146
6.2.3 超宽带脉冲穿过非均匀平面平行层	152
6.2.4 点源激发的脉冲在平面层介质中的传播	157
小结	166
问题和检测试题	167
参考文献	168
第7章 超宽带电磁脉冲在导电和介电目标上的散射	171
引言	171
7.1 脉冲电磁波在导电目标上的散射	172
7.1.1 问题的提出,计算关系式的推导	172
7.1.2 波在理想导电矩形板上的散射	174
7.1.3 波在理想导电椭圆体和球体上的散射	176
7.1.4 波在理想导电有限圆锥体上的散射	177
7.1.5 爬行波	178
7.2 平面脉冲电磁波在介电目标上的散射	180
7.2.1 对介电球体上散射的小波分析	180
7.2.2 数值结果及其讨论	181
小结	183
问题和检测试题	184
参考文献	186
第8章 目标和传播通道的脉冲响应	188
引言	188
8.1 脉冲响应:信号的模型及其频谱特性曲线	188

8.1.1	脉冲响应的概念:它们的形式和性质	188
8.1.2	信号的包络线、瞬时相位和瞬时频率:解析信号	189
8.1.3	克拉默斯-克罗尼格(Kramers-Kronig)型关系式	190
8.1.4	指数衰减信号的极点模型	191
8.1.5	在脉冲响应估计和重建中采用的奇异展开方法	193
8.2	采用调整法和克拉默斯-克罗尼格型关系式,以估计传输 函数和脉冲响应	194
8.2.1	一般关系式	194
8.2.2	采用调整法和克拉默斯-克罗尼格型关系式,以重建 传输函数和脉冲响应	196
8.2.3	采用两个相位频谱模型对脉冲响应估计的比较	200
8.3	在传播通道脉冲响应估计问题中信号的极点模型	201
8.3.1	利用极点函数的信号表达和对脉冲响应的估计	201
8.3.2	同轴电缆传输线脉冲响应的估计	203
8.3.3	脉冲响应重建对探测脉冲形状和测量噪声的稳定性	205
8.4	在导电球体和圆柱体脉冲响应估计中信号的极点模型	206
8.5	超宽带脉冲通过线性畸变通道后的重建	209
8.5.1	脉冲重建问题的求解	209
8.5.2	数值模拟	211
8.5.3	超宽带脉冲重建方法的实验检验	212
	小结	213
	问题和检测试题	214
	参考文献	215
第9章	接收天线	217
	引言	217
9.1	接收天线的传输函数	218
9.1.1	接收天线传输函数的确定	218
9.1.2	天线接收导线中的电流分布	220
9.1.3	直线接收天线的电动力学参数	225
9.1.4	直线接收导线的传输函数	229
9.1.5	曲线接收导线的传输函数	233
9.2	接收天线引起超宽带电磁脉冲的畸变	237
9.2.1	偶极子对超宽带电磁脉冲的接收	238
9.2.2	环形天线对超宽带电磁脉冲的接收	241
9.2.3	接收功率和散射功率的比值	243
9.3	减小接收信号畸变的方法	244

9.3.1 具有不同轴臂的长偶极子	245
9.3.2 失配方式下的短偶极子	250
9.3.3 有源天线	253
9.4 测量超宽带电磁脉冲空间-时间结构的向量天线	260
9.4.1 向量接收天线的构建原理	261
9.4.2 对脉冲电磁场极化结构的研究	271
9.4.3 超宽带电磁脉冲到达方向的确定	273
小结	275
问题和检测试题	275
参考文献	276
第10章 发射天线	279
引言	279
10.1 发射天线的传输函数	280
10.1.1 辐射源的传输函数	280
10.1.2 直线辐射器中的电流分布	283
10.1.3 直线辐射器的传输函数	285
10.2 超宽带电磁脉冲在辐射时的畸变	291
10.2.1 单极子和同轴偶极子辐射的脉冲形状	291
10.2.2 V形辐射器辐射的脉冲形状	294
10.2.3 环形辐射器辐射的脉冲形状	299
10.3 发射天线通频带扩展方法	300
10.3.1 决定辐射器匹配频带的能量关系式	301
10.3.2 直线辐射器的品质因子	304
10.3.3 组合辐射器的通频带	309
10.4 平面组合天线	312
10.4.1 不平衡组合天线	313
10.4.2 平衡组合天线	320
10.5 体积组合天线	323
10.5.1 低功率脉冲的辐射	323
10.5.2 辐射高功率脉冲的天线	329
小结	332
问题和检测试题	333
参考文献	333
第11章 天线阵列	338
引言	338
11.1 天线阵列的方向性能	339
11.1.1 数值计算	339

11.1.2	实验研究	342
11.2	天线阵列的能量特性	347
11.2.1	分配系统	347
11.2.2	辐射系统的结构	352
11.3	辐射垂直极化脉冲的天线阵列	357
11.4	在波束扫描方式下直线天线阵列的特性	360
11.4.1	纳秒脉冲对阵列的激发	360
11.4.2	皮秒脉冲对阵列的激发	364
11.5	有源接收天线阵列	372
11.5.1	平面双极阵列	372
11.5.2	分立扫描的直线双极阵列	379
小结		383
问题和检测试题		383
参考文献		384
第 12 章	高功率超宽带辐射源	389
引言		389
12.1	超宽带源的极限有效辐射势	390
12.2	双极高压脉冲发生器	395
12.2.1	单极电压脉冲发生器	395
12.2.2	开路线的双极脉冲形成器	398
12.3	单个天线的辐射源	405
12.4	同步激发多单元阵列的辐射源	409
12.4.1	4-单元阵列的辐射源	409
12.4.2	16-单元阵列的辐射源	413
12.4.3	64-单元阵列的辐射源	418
12.5	垂直极化脉冲的辐射	422
12.6	方向可控的四通道辐射源	423
12.7	频谱可控的辐射源	430
小结		435
问题和检测试题		436
参考文献		436
附录 1	符号表	441
附录 2	缩略语	445

第 1 章 超宽带脉冲无线电系统引言

一般情况下,超宽带脉冲无线电系统不仅包括与测量数据处理系统组成一体的发射器和接收器,还包括辐射超宽带脉冲的传播通道(介质)及通道中的散射目标。超宽带电磁脉冲辐射,就是它的频带宽度与其平均频率相当的辐射。

在超宽带脉冲无线电系统发展过程中,对它们的分类曾提出几种思路。这里只讨论其中的两种。第一种思路的定义^[1]是基于相对频带的估计,这主要用于通信和雷达系统的研制方面。辐射脉冲的相对带宽由下式确定:

$$\eta = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (1.1)$$

式中: f_H 和 f_L 分别为脉冲频谱的上边界频率和下边界频率,它们在频谱 10dB 水平上计算。这里将超宽带辐射理解为相对频带 $\eta \geq 0.2$ 和绝对频带 $\geq 500\text{MHz}$ 的辐射。后面,将窄带辐射理解为相对频带 $\eta < 0.01$ 的辐射,而宽带辐射为相对频带满足 $0.01 \leq \eta < 0.2$ 的辐射。

辐射分类的第二种思路^[2],是建立在频率带比 $b = f_H/f_L$ 基础上的,该系数由下面公式表示:

$$b = (2 + \eta) / (2 - \eta) \quad (1.2)$$

按第二种思路可分出四种频带:①窄带,即 $b < 1.01$;②中带,即 $1.01 \leq b \leq 3$;③超中带,即 $3 < b \leq 10$;④超带,即 $b > 10$ 。这种频带分类法是针对从事在高功率电磁脉冲作用下无线电电子设备稳定性(功能失效)问题研究者的,同时也适用所谓电磁兼容(EMC)领域的研究工作。窄带辐射对应的是第一频带 $b < 1.01$,这与上面讨论 $\eta < 0.01$ 的思路是一致的,而超宽带辐射对应的是剩下所有的频带,如文献[3]中提出的那样。在文献[4]中,提出将第四频带 $b > 10$ ($\eta > 1.63$) 归到超宽带信号范畴。根据前述的第一种思路,超宽带辐射对应频带 $b \geq 1.22$ 。应当指出,在后面进行的辐射脉冲估计中将采用第一种分类思路。

因此,现在可以将超宽带信号及相应的无线电系统分为三种基本类型:

- (1) 基于频率和相位调制的信号,以及类噪声无规则信号。
- (2) 辐射中心频率不同的射频脉冲信号序列(时频调制)。
- (3) 无射频载波的短电磁脉冲。

下面利用短的电脉冲能量直接转换为电磁辐射能量,主要研究超宽带无线电系统。对于这样的系统,首先是在对包括生物体在内的目标和介质作用的情

况下,研究系统的非线性和非稳态过程。此外,它们的重要应用领域还包括无线电电子学设备在电磁脉冲作用下的稳定性研究,现代雷达的研究和研制,诊断目标的识别,以及对脉冲通信系统和电磁兼容的研究等。

将超宽带天线理解为满足信号不畸变传输条件的辐射器。在物理上,这个条件要求在天线中存在辐射相位中心,并且在给定的超宽带信号频率范围内这个中心是稳定的。这表明,与频率无关的宽范围天线^[5](例如螺旋天线和对数周期天线)不属于超宽带天线,因为这些天线在辐射时并不使超宽带脉冲发生畸变。后面在研究无线电系统时将细致地分析在辐射和接收短电磁脉冲方式下工作的超宽带天线。

下面集中注意力在高功率超宽带脉冲下工作的无线电系统。这种状况是由于短电磁脉冲能量的增大引起的,而这又是增大无线电系统作用距离所必需的,这可能只有通过增大峰值功率才能做到。超宽带辐射脉冲的能量在空间上的分布与辐射器的方向图是一致的。对于不同的应用,必须知道在远区 r 距离上方向图主方向的脉冲电场 E_p 的峰值场强。因此,表征超宽带无线电系统的主要参数,不论是高功率系统还是低功率系统都是由 rE_p 乘积决定的辐射有效势。本书将高功率无线电系统理解为辐射的峰值功率大于或等于 100MW 的系统。

1.1 超宽带无线电系统的发展历史

超宽带无线电系统的历史^[6-9]是从 H. 赫兹在 1887 年和 1888 年间的实验开始的。在他的实验中,探测了利用产生衰减电振荡的火花发生器和天线作为发射器辐射电磁波的方法,晚些时候就将天线称作赫兹电偶极子,同时他在实验上证实了 J. K. 麦克斯韦在 1865 年理论上预言的电磁波的存在。为了记录电磁振荡,赫兹最初采用了火花指示器和天线环,而在抛物线型镜面天线用于辐射电磁脉冲的实验中,他还采用了电偶极子记录这些脉冲。他预先根据 LC 回路振荡公式估计了共振频率,并将发射接收系统调整到这个频率。

在实验中,辐射了宽带电磁脉冲,其带宽由衰减振荡周期数决定,而接收天线在共振频率上截取了窄带辐射。这是因为记录辐射利用了共振接收天线和火花指示器,这里的火花指示器是指与接收天线圆环或偶极子终端连接的两个球电极之间,在空气中产生火花击穿并在黑暗中用肉眼确定的火花数。但是,当时还不能够记录辐射的电磁脉冲。这些研究的重要结果,是在物理上从牛顿和他人的瞬时作用力理论转为法拉第提出场的力线以及接着由麦克斯韦发展的电磁波有限传播速度的近距离作用理论。

超宽带无线电系统发展的一个重要阶段,是 1895—1913 年,在这个阶段俄

罗斯人 A. C. 波波夫和英国人 G. 马可尼同时又相互独立地发明了无线电。开始时,无线电用来传送信息,而在阶段结束时 A. 迈斯涅尔建成了真空管振荡器,接着在通信系统中转为采用不衰减的电磁振荡,即较为窄带发射阶段。这个阶段的重要任务是增大信号传送的距离。为此目的,对于直视范围外的无线电通信,采用了无线电波的衍射和天线系统本身在共振频率上的电磁振荡激励,这就导致了建设庞大的无线电设施和利用 10~100kHz 频率。1901 年,马可尼实现了从英国经过大西洋 3500km 距离到加拿大的无线电通信。根据这些实验,1902 年 A. 肯涅里和 O. 赫文赛德各自独立地提出了在地球大气中存在可反射电磁波的电离区域即电离层的假设,这个假设晚些时候在 1924 年和 1925 年间被直接测量电离层高度的实验所证实。

为了传送信号,采用了莫尔斯编码,即长的和短的衰减振荡序列。增大衰减振荡幅度和减小它的时间宽度,即增大辐射功率和频谱就必须寻找火花开关和天线有效工作方式的新技术解决办法。减小衰减振荡的时间宽度,曾设想通过外作用来减小开关中等离子体去电离的时间来实现。最初的研究已经表明,为了增大天线的通频带,必须增大它的面积或体积。在这一时期直到 20 世纪末所研制的超宽带天线的基本结构,尤其是用于无线电通信系统的,都在专著 [10] 中给出了描述。

应当指出,在这一研究时期,探测了根据金属反射无线电波而探测金属目标的方法,这是 1904 年由 X. 休斯梅尔完成的。在他的专利中描述的装置,包括有火花发射器、定向天线和接收器,后者就是布兰里-楼日金属屑检波器,在 A. 波波夫和 G. 马可尼最初的实验中也都采用过。后来,雷达成为无线电脉冲应用的主要方向之一,尤其是在军事领域^[11]。

H. 斯特拉的研究工作^[12,13],对高功率超宽带无线电系统的发展做出了很大贡献。他提出的基本思想,使得能无线传送能量和信息到很大的距离上。他从实验观测到的雷电放电现象得知,有时记录的信号随着雷电远离而增大。这就使得他设想,在对地放电时,在共振腔中出现类似的驻波。这里还应当指出, A. C. 波波夫最初的实验也与记录雷电场有关,因此他的第一台仪器曾称作雷电指示器。为了实现自己的思想, N. 特斯拉在 1891 年制成了共振变压器,就是现在所说的“特斯拉变压器”,他在 1892 年的最初实验中,就已经得到了输出电压 1MV, 尔后是 4MV 的结果。

为了传送能量到很大的距离上, H. 特斯拉曾设想调试他的变压器与地球共振,同时实现对地的高压放电,并激发约 10Hz 频率的波沿着体积共振器的地球表面传播,而这个体积共振器代表的是围绕地球的空间。过了半个世纪, V. 舒曼^[14,15]指出,有可能在地球-电离层的空腔中激励出全球的共振电磁振荡,他还计算了地球-电离层共振腔的本征频率谱,同时指出雷电放电作为自然的超

低频振荡源的重要作用。他发现,存在两种类型的本征频率,其中第一类本征频率的近似表达式,可以写作

$$f_n \approx 7.5n\text{Hz}, \quad n=1,2,\dots \quad (1.3)$$

而第二类本征频率的表达式为

$$F_n \approx 300f_n \quad (1.4)$$

第一类共振,称作低频共振,或者舒曼共振,而第二类共振称作高频共振。应当指出,舒曼共振的频率与特斯拉估计的一致。

为了分出通信通道即选择振荡,N. 特斯拉于 1893 年提出采用共振回路作为发射器和接收器,当时他不知道 W. 克鲁柯斯于 1892 年提出的类似建议。应当指出,共振回路在通信系统中开始使用,比 A. C. 波波夫和 G. 马可尼最初的实验晚很长时间。N. 特斯拉 1893 年开始研制无线电系统。此时,他指出,他的思路与赫兹当时采用自由空间的电磁波不一样。

在 1899 年和 1900 年,N. 特斯拉建立了基于共振变压器的实验装置,这个装置由幅度 12MV 的振荡在 100kHz 频率下激发。变压器绕组的高压端与直径 30 英寸(1 英寸=2.54cm)的空心金属球连接,该球置于地面上方 142 英尺(1 英尺=0.3048m)处。长波的电磁振荡,处于千米级波长范围,在大气中电气放电时对它进行了测量。为了产生短波振荡,建立了输出电压 400kV 装置。放电是在直径 30 英寸的球体与接地金属板之间进行,在不限电流条件下传播的电磁波引起了测量回路中仪器绝缘的击穿。可以假设,根据辐射器尺寸,它是处在约 100MHz 的频率范围。何况,在距实验室很大距离的供电站发电机上,发生了与这种放电有关的短路。看来,这是高功率电磁脉冲导致目标失效的第一批试验。

正如前面指出,20 世纪 20 年代,转向窄带信号降低了对发展超宽带无线电系统的兴趣。但是在四五十年代,情况发生了急剧变化。这是由两组原因造成的。第一组原因,是与美国在 1945 年和苏联 1949 年进行了原子弹试验有关。这些试验表明,核爆炸产生的电磁脉冲(ЭМИ ЯВ)是核爆炸毁伤因素之一,而这个电磁脉冲又是超宽带的;第二组原因,是研究者意识到,为了改进雷达的空间分辨 Δr 与 $1/\Delta f$,使其呈比例关系并增强传输通道的通过容量 C ,必须采用宽频带 Δf 的辐射脉冲。根据香农(Shannon)定律^[16,17],有

$$C = \Delta f \log_2(1 + P_s/P_N) \quad (1.5)$$

式中: P_s 和 P_N 分别为信号功率和噪声功率。这两个研究方向同时并相互独立地发展,只是到了 20 世纪 90 年代,在解决高功率超宽带脉冲对自由空间中目标作用问题并研制高功率超宽带雷达时,这两个方向才开始接近。

下面将首先研究在核爆炸电磁脉冲作用下目标稳定性试验问题引发的超宽带系统的发展。将区分高空核爆炸与地上核爆炸的电磁脉冲,以及电磁脉冲

辐射的早期部分与晚期部分。所有这些都是由于核爆炸电磁脉冲形成中物理过程不同决定的^[18-20]。

为了简化,将主要研究高空核爆炸电磁脉冲的早期部分。下面阐述一下核爆炸能量转换为电磁脉冲的物理机制:核爆炸产生的 γ 量子与空气原子发生相互作用,并从空气原子中打出快康普顿电子和光电子。这些电子沿着 γ 量子方向运动,称作间接电流,它们导致介质极化并产生径向电场。快电子使空气电离,使其变成导电的。在极化电场作用下,导电空气中产生电导电流,即感应电流。总电场的强度,由间接电流和电导电流的比值决定。在真实条件下,间接电流和电导电流的空间分布是不对称的,这将导致出现电磁辐射,并使其从电磁脉冲源区向更大距离传播。

在高空核爆炸时,不对称因子包括有地电场和地磁场、大气随高度的不均匀性、地表下的导电表面和电离辐射输出的可能不对称性。高空核爆炸产生的早期电磁脉冲,具有的时间特性和频率特性如下:它的波形前沿在0.1~0.9幅度水平上的时间宽度为2.5ns,在峰值场强50kV/m时它的脉冲幅度半高处的时间宽度为25ns;就电磁脉冲的高频成分而言,它的能量主要份额集中在0.1~100MHz频率范围内。

电磁脉冲的晚期部分是低频的,具有很大的时间宽度,但是它的场强却非常小。由于核爆炸条件各种各样,而核弹头参数可以非常不同,因此电磁脉冲特性可在很大范围内变化,这些可以通过本章引用的文献查到。只是应当指出,超-电磁脉冲的前沿宽度等于0.5ns,而电磁脉冲的波形并不总是所需单极性的,可能有几个时间瓣^[21]。

在1963年,苏联、美国和大不列颠签订了关于在三种介质环境中禁止核武器试验的协定后,许多国家(美国、苏联、英国、法国、中国、德国、意大利、瑞典、荷兰、瑞士、以色列)开始开展了建设核爆炸电磁脉冲模拟器的工作。现在这类模拟器,可以分成两类:①在自由空间产生平面波的模拟器,用于试验飞行的导弹、飞机;②产生平面波加上地表面反射的平面波的模拟器,用于试验地上的目标。

核爆炸电磁脉冲模拟器可以分成三种基本类型^[22,23]:

(1) 波导线型或传输线型模拟器。这样的模拟器用得最广,它们用于模拟均匀的横向电磁(transverse electromagnetic)波,即TEM平面波。线的输入端与给定时间波形的高电压脉冲发生器连接。目标置于线的中部,而在线的终端接入匹配的电阻负载,以吸收通过的脉冲。

(2) 混合型模拟器。该模拟器的特点,是将模拟高频(早期的)电磁场和低频(晚期的)电磁场两种类型源兼容在一起工作。混合型模拟器,可以模拟有地球表面反射或没有这个反射两种情况。