

微波电磁兼容学研究的若干情况和问题

黄志洵

(北京广播学院微波工程系,北京 100024)

在林为干教授的启发、引导下,本文提出了“微波兼容性”(Microwave Compatibility)概念,并从各个角度阐述了这一学科分支的若干研究情况和问题。指出,军事应用和作战需要是开展研究的重要推动力,但在其他领域亦有重要的意义。

电磁兼容(EMC)有关标准文件中规定的有关设备是很广泛的,频率范围从 20Hz 到 40 GHz。尽管一门学科不能根据频段而作机械的分割,我们仍然可以对“微波电磁兼容”(EMC on Microwave)一词的内涵作出分析性阐述和规定。这种努力往往是某个学科分支的成长的基础。通过它可以了解国内外高技术发展的动态和方向。

林为干教授曾指出^[1]:“微波所含的内容非常丰富,可应用于雷达、导航、通信、控制和指挥等广泛领域中,从而出现了微波兼容问题,亦即电磁兼容问题。就是说在无孔不入的微波存在的空间,各种电磁设备如何生存和工作下去的问题,也就是在电磁环境中各种系统和设备的兼容问题。恶劣的环境在战争和军事对抗中是对方制造的,我们如何对付呢?这就产生了电子对抗这门新的学问。”他又说^[2]:“在最近的海湾战争中的电子战,实质上就是频谱战——谁掌握更宽的频谱,谁就占上风”。

林先生的上述言论,简单而深刻!当然,微波电磁兼容学并非只为军事和战争服务,而是有更广泛的意义。但不可否认,军事和战争用途常常集中而突出地表明一种技术可以达到何种程度,而其中反映出来的国际水平又是怎样,

因而,非常值得我们注意。

一、现代战争中的微波兼容性问题

1990年,美国“Microwave News”(Vol. 9, No. 3)杂志谈到美国空军攻击利比亚时,两架战机莫名其妙地自行坠海沉没。专家们怀疑,是否自己的微波干扰了自己的仪器设备?用 EMC 术语讲,这是个“intra-system EMC”(系统内电磁兼容性)问题,这个“系统”是飞机,也可把它看成是个“内部抗扰度”问题,即对来自内部的干扰的抵抗力如何?我们在日常生活中也会遇到这样的事:看甲频道的电视节目时,在背景上发现有乙频道节目的模糊印迹,这就是电视接收机这个系统内的频道间抗扰度太差。所以林为干先生感叹说:“微波兼容性问题无疑是电磁波技术今后应极力重视研究的问题。”

对于“系统”是一条军舰的情况,通信、导航、水声、雷达、识别、侦察等仪器设备是很多的。仅雷达就有远程预警、警戒、炮瞄、导航、导弹攻击等多种,导航方面有导航用接收机、卫星导航系统等。这些设备拥挤在狭小空间中,天线林立,电磁环境(EME)恶劣。由于互相干扰,在陆上合格的设备,安装在舰船上有可能失常;此外,还有可能发生导弹、鱼雷的误动作,以

(1981), 150; N. Sakai, *Z. Physik C*, 11(1981), 153.
[10] S. Ferrara and O. Piguet, *Nucl. Phys.*, **B93**(1975), 261; M. Grisaru et al., *Nucl. Phys.*, **B159**(1979), 429.
[11] S. Mandelstam, *Nucl. Phys.*, **B213**(1983), 149; A. Parks and P. West, *Phys. Lett.*, **B122**(1983), 365; **B138**(1984), 99; P. West, *Phys. Lett.*, **B136**(1984), 371; L. Mezincescu and D. R. Jones, *Phys. Lett.*, **B136**(1984), 242; **B138**(1984), 293; X. D. Jiang and X. J. Zhou, *Phys. Lett.*, **B197**(1987), 156; *Phys.*

Rev. D, **42**(1990), 2109.
[12] J. Ellis et al., *Phys. Lett.*, **B249**(1990), 441; U. Amaldi, W. de Boer and H. Furstenaue, *Phys. Lett.*, **B260**(1990), 447.
[13] S. Coleman and J. Mandula, *Phys. Rev. D*, **159**(1967), 1251.
[14] B. Zumino, *CERN Courier*, Jan. (1983), 13; P. West, *Introduction to Supersymmetry and Supergravity*, World Scientific, (1986); R. Mohapatra, *Unification and Supersymmetry*, Uni. of Maryland, (1986).

及电磁辐射危害人员健康等问题。

众所周知,1991年海湾战争的第一阶段是代号为“沙漠风暴”的空袭阶段(38天),第二阶段是代号为“沙漠军刀”的地面进攻阶段(4天)。以美军为首的多国部队,死亡人数只占参战人数的0.18%,损失飞机只占参战飞机架次的0.36%,创造了奇迹。多国部队采用了大量高技术手段,例如使用了由电子战飞机、以陆地为基地的飞机及军舰上电子干扰设备构成的“综合电子干扰系统”,针对伊拉克军队的C³I(指挥、通信、控制、情报)系统和雷达进行压制性干扰,使之失去作用。在“沙漠风暴”开始前实施了23.5h的压制性干扰;十余架EA-6B型电子战飞机在64MHz—18GHz频段对伊拉克军队防空雷达网和通信网实施干扰,从而证明了制电磁权(用电磁波制服敌方)的重要。多国部队还使用了波束捷变雷达和频率捷变雷达(“爱国者”导弹系统有160个点频)^[2],从而提高了抗干扰能力。

二、电磁脉冲(EMP)和核电磁脉冲(NEMP)在微波段的影响

瞬态电磁场(transient EM fields)的问题近年来得到广泛的注意。首先,许多电磁干扰(EMI)形式本身是脉冲干扰;其次,闪电和雷击这一自然现象使电磁脉冲(EMP)问题突出起来;最后,核弹的研制、生产和实验在我们这个星球上是客观存在,迫使人们研究核电磁脉冲(NEMP)的影响。由于脉冲是广谱信号,脉冲前沿越陡,宽度越窄,频谱在微波区域的能量就越大。显然,微波兼容性研究人员必须关注和重视瞬态场。

气象学家的研究表明,云中闪电约有10个脉冲,持续时间可为 $27.5\mu\text{s}$,间隔约 $20\mu\text{s}$;其频谱,即使在微波($\lambda \cong 10\text{cm}$)仍有不小的辐射能量^[3]。

假如闪电的脉冲前沿时间为 $1\mu\text{s}$,核电磁脉冲的前沿时间可小于 $0.01\mu\text{s}$!这是因为核爆炸后 γ 射线立刻射出。如此陡的前沿,说明微波的频谱能量不可忽视。E. Teller曾估计,如

在美国中部500km高空爆炸一颗氢弹,全美半数以上的通信设备和电子计算机将停止工作^[4]。1991年1月14日,美国“News Week”杂志报道说,驻海湾的美军司令施瓦茨科普夫将军要求总统授权——在战争爆发后在伊拉克上空搞一次核爆炸,目的是产生巨大的NEMP,使该国所有的电子设备停止工作。但是,布什总统拒绝了这个建议,因为加入反伊拉克联盟的国家是以不使用核武器为条件的。

对TEMPEST(原文为Transient EM Pulse Emanation,瞬态电磁脉冲辐射标准),发达国家已进行深入研究。它用来规范保密性信息设备的生产、使用和监护,也叫防泄漏技术。它或者关系着军事情报不被敌方窃取,或者关系着数以亿计的美元的安全,或者关系着最新工业技术发明的专利保密。1985年,荷兰人W. van Eck^[5]使用一台经过改装的黑白电视接收机,在相当远(至少几百米)的距离给参加国际计算机和通信安全防护第三届大会的代表们表演了对大楼内计算机房屏幕信息的窃收,引起很大兴趣。电视机附加有增益18dB的VHF放大器,天线(增益10dB)高架在汽车顶上,最高可达10m;大楼八层某办公室文字处理机显示的内容,清晰地出现在敞蓬汽车中电视机的屏幕上^[6]。

TEMPEST技术标准很多还属于绝密文件。例如,1970年美国安全局(NSA)制定了NACSIM 5100,1974年颁布5101和5103,1981年颁布5100A。在欧洲,北大西洋公约组织于1982年颁布了标准AMSG 720 B;英国则为BTR/01/202。上述文件内容不得而知。公开的技术标准,其出发点常常是为了保护通信和无线电接收,使之不受计算机辐射的干扰。例如,在德国发生过这样的事¹⁾:当城市中发生火灾时,消防队与警察局之间的无线电通信中断,原因是附近商业中心的大量计算机系统产生的“电磁烟雾”把通信信号淹没。德国电气工程师

1) K. O. Müller, Measuring EMI and Wanted Signals, Rohde & Schwarz Co., (1990), 4; 译文见《EMI测试接收机与电磁兼容技术》,微波学会微波电磁兼容专业委员会,(1992),4.

协会(VDE)制定的标准 VDE 0878, 在宽阔的频率范围(10 kHz—1 GHz)内,规定了信息技术设备(ITE)的辐射限值^[7]。美国联邦通信委员会(FCC)是在 30—1000MHz 范围作出规定^[8]; 美国军标(MIL-STD-461 C, 462)是在 14 kHz—10 GHz 范围作出规定。显然,这些标准都十分重视微波波段。我国也参照国际标准制订了自己的公开标准^[9,10]。

文献[11]计算了输入周期脉冲串时显示器(CRT)泄漏电场频谱,结果表明,直到 300MHz 时强度无明显降低。同时,人们又实测了 IBM-PC 机的泄漏电场频谱,结果表明,直到 247MHz 时仍有相当强度。这些事实都说明,对中短波、超短波和微波的 ITE 辐射必须高度重视。

三、航天测量船发现的微波兼容性问题

在“远望一号”航天测量船上工作的科学工作者认为^[1],这种船上的 EMC 问题是非常复杂的。船上有测量雷达、船载卫星通信站、微波统一测控系统等; 它们同在 C 波段(3.95—5.85 GHz),同是大功率设备,又都用大型天线,接收机灵敏度又都较高,加之相互靠得很近,故可能造成严重的相互干扰。对此,实验证明加装滤波器可收到较好的抗干扰效果。

短波发射机功率达几百瓦,其高次谐波处在超高频、微波区域,值得注意。此外,区域内一些物体(如固定用金属线缆等)可能成为非线性的二次辐射源,会对超高频、微波接收设备产生高次谐波干扰。

四、对电磁波隐身技术的发展

第二次世界大战中,德国科学家为避免同盟国飞机上的雷达侦察到水下的德国潜艇,改变了通气管的外形并覆盖一层微波吸收材料(在胶基中渗碳),从而减小了反射波能量,使猎潜飞机失去依据。这是隐身技术的开始。

飞行体的雷达可检测性是用 RCS 这个指标表示的,原文是 Radar Cross Section,译作雷达反射截面。一辆卡车的 RCS 可达 200m²,

一架 B-52 轰炸机的迎面 RCS 约 100m², B-52 飞机的体型比卡车大许多倍,其 RCS 却只有后者的一半;这是因为它具有流线型的外形,而卡车却有许多反射微波的凸缘和角,甚至会因谐振现象而造成反射波大于入射波,即反射系数模大于 1。

B-52 飞机的四个大发动机都吊在机翼下,对雷达波仍有较大的反射截面。B-1 型轰炸机把发动机靠近机身安装,这一改进使 RCS 降到 10m²。设计人员仍不满意,对 B-1 型轰炸机再次改进(例如去掉突出物,改进进气口的形状),结果使 B1-B 型轰炸机的 RCS 降到 1m²。

这还不代表美国的最高水平。通过加强对电磁散射的研究,以及采取改进外形设计、覆盖特殊吸波材料等措施,使战斗轰炸机 F-117A 的 RCS 降到 0.0 1m² 以下!这是杰出的成就。实际上,早在 1985 年,国际新闻界就传出消息,说美国已有能躲避雷达追踪的战斗机(当时说的是 F-19),它将使航空和防空发生根本性变化。海湾战争中 F-117A 大显身手,在频繁出击中无一架被击落。这固然是由于美国出动了大批干扰机,但隐身技术的作用亦不能忽视。

奇妙的是,导波理论的研究与隐身技术有关。当外来波通过喷气发动机入口时,好象经过波导或谐振腔(终端短路波导)。这方面最早的讨论见文献[12],近期的研究见文献[13, 14]。文献[13]指出,短路波导的内辐射对 RCS 的贡献主要来自一些低阶简正模;靠着衰减低阶模,加衬波导(lined waveguide)的有耗内衬介质层象一个模抑制器,因而降低腔体的 RCS。文献[14]指出,如果频率低、内衬层有轻度损耗,用单一薄层即可使低阶模受到高衰减;频率高时,单层内衬只能在一个窄频带内降低 RCS。1988 年, R. C. Chou 和 S. W. Lee 在文献[15]中讨论了多层介质内衬圆波导。1989—1991 年,黄志洵和曾诚在加衬圆波导方面发表了几篇研究论文^[16],提出了普遍化特征

1) 晏振乾、陈芳允,航天测量船电磁兼容情况简介及选频技术的应用,第三届全国电磁兼容学术会议交流论文,北京邮电学院,(1990),1。

方程并研究了用电子计算机求解的方法。

可见,在隐身技术的研究工作中,需要加强基础理论的探索。如希望在更宽阔的频谱内隐身,就更需要抓好有关理论研究工作。

五、EMC/EMI 测量的硬件建设

1901年, M. G. Marconi 实现了越过大西洋的无线电通信后,电台数目从无到有逐渐增多。1902年,美国人在快艇竞赛中发现了严重的发射机干扰,又发现汽车点火系统的辐射对接收机的干扰。1905年, Marconi 本人曾处理过电台之间射频干扰的问题。这些是 EMI 或 RFI 的早期表现。30年代,发明了屏蔽室;今天它已获得极广泛的应用。铜丝网屏蔽室、拼装式屏蔽室的屏蔽效能都在 80dB 以上,固定式屏蔽室则超过 120dB。

美国人于 1940 年率先建造了无回波室,也叫电波暗室。它是在室内六个壁上安装角锥状吸波物,常做成正四棱锥尖劈状,频率越高锥的尺寸越小。在室内,电磁波的运动很复杂,是多波干涉空间。在某处形成静区,其静度在 -50—-70dB 以上。在国外,最大的无回波室的尺寸可能是:宽、高均为 15m,长为 53m。

屏蔽室和无回波室现在仍很有用;但它们不能指出场强值。60至80年代,诞生了“横电磁波测试室系列”,主要有以下三种:

1. 平行板横电磁室: 它于 1967 年付之实用¹⁾。目前,常用于产生 150 MHz 以下的环境场,以测试广播电视接收机、ITE 等。此外,它还可用于瞬态场实验,故又称为“EMP 模拟器”^[17]。使用时,它一般放在屏蔽室内。

2. 横电磁传输室: 1971年,它由美国空军航天医校率先建造^[18]。由于它是全封闭结构,故无需屏蔽室。它用途广泛,例如计量部门可用它作为电场标准,以及 150 MHz 以下的广播电视设备,ITE 测试等^[19]。

3. 千兆赫横电磁室: 1987年,它由两位瑞典人发明。它是锥状结构,其内为球面 TEM 波(前二者是平面 TEM 波)。用尖劈吸波物组成了负载,改善了微波时的驻波曲线,故可用

在 1—2GHz。黄志洵和贺涛^[19]讨论了其理论计算方法。

从微波电磁兼容性研究的角度看,千兆赫横电磁室的意义最大。现在欧洲已建造了体积很大的室,最大的已可把汽车(作为受试物)开进去进行实验。国内也已有几家研究单位进行了研制。这种形势要求理论工作跟上^[20],以更深刻地掌握其客观规律。

六、关于“电磁导弹”的研究探索

美籍华人吴大俊(T. T. Wu)于 1985 年发表一篇论文^[21],说明如用瞬态时域广谱信号激励天线,辐射的波的传播规律与自有天线以来人们习惯的稳态激励的辐射波有重大的区别。通常的近区和远区概念不再有效。具体说,传统理论认为,在远区,场强按 r^{-1} 规律、功率按 r^{-2} 规律降低,而瞬态辐射的 EMP 的功率减小可比 r^{-2} 规律慢得多。因此,电磁导弹效应(EM missile effect, 简称 EMM)被定义为“以有限的能量、在远区不按通常的球面波规律(r^{-2})衰减,而是较之慢甚至任意慢的瞬态电磁波”^[22]。这样,同样的发射功率可以探测更远的目标,即提高雷达的作用距离和发现低 RCS 目标的能力。当然,我们也可对更远的目标实施干扰。显然,这一课题的先行研究具有重要意义。现在,人们已研制出所谓 EMM 辐射器。理论研究表明,有限区域内的慢衰减是脉冲辐射的普遍特性;而形成 EMM 的关键是激励信号波形前沿的性质,与脉宽无关。不过,脉冲足够窄仍是形成无衰减区的必要条件。显然,窄脉宽导致高频分量丰富,因而可与本文的论题联系起来。

从以上内容可以看出,微波电磁兼容性研究这一学科分支所需进行工作的范围、内容、意义、方法和规模。与它有关的科学技术问题十分复杂。它与其他技术学科有机地交织在一起,如果大力开展工作,它将成为引人注目的、
(下转第 228 页)

1) 美国军标“MIL-STD-462”中的 RS-04 通告,美国国防部,(1967),1。