

- [9] Mendlovic D *et al.* Appl. Opt. ,1995 ,34 :303 —309
- [10] Lohmann A W *et al.* Opt. Lett. ,1996 ,21 :281 —283
- [11] Zhang Y *et al.* Opt. Lett. ,1997 ,22 :1583 —1585
- [12] Mendlovic D *et al.* Appl. Opt. ,1994 ,33 :6188 —6193
- [13] Liu S *et al.* Opt. Lett. ,1995 ,20 :1053 —1055
- [14] Dorsch R G. Appl. Opt. ,1995 ,34 :6016 —6022
- [15] Andr  P *et al.* J. Opt. Soc. Am. A , 1996 ,14 :853 — 858
- [16] Kutay M A *et al.* IEEE Trans. Sign. Process. ,1997 , 45 :1129 —1143
- [17] Zhang Y, Gu B Y. Appl. Opt. ,1998 ,37 :6256 —6261
- [18] Mendlovic D *et al.* Appl. Opt. ,1997 ,36 :4801 —4806
- [19] Wood J C, Barry D T. IEEE Trans. Signal Process. , 1994 ,42 :2105 —2111
- [20] Zhang Y *et al.* Opt. Lett. ,1998 ,23 :1126 —1128

现代雷达中的光电子技术 *

蒋 跃

(空军雷达学院物理教研室 武汉 430010)

摘 要 介绍了光电子技术在现代雷达中的主要应用.在雷达信号传输、光信息处理和微波器件的光控制等方面,光电子技术的应用显示出广阔的前景和巨大的经济、军事价值.

关键词 光电子技术,光纤链路,光纤延迟线

APPLICATIONS OF OPTOELECTRONIC TECHNOLOGY IN ADVANCED RADAR

Jiang Yue

(Teaching and Research Section of Physics, Air Force Radar Academy, Wuhan 430010)

Abstract The main application of optoelectronic technology in advanced radar systems are described, demonstrating the vast prospect and immense value to the economy and defence, with regard to radar signal transmission, optical information processing and optical control of microwave devices etc.

Key words optoelectronic technology, fiber - optical links, optical fiber delay - line

1 引言

如所周知,物理学不仅是自然科学的基石,而且也是高新技术的重要生长母体,是现代高技术兵器研制的先导.光电子技术就是由物理学生长出来的一门崭新技术学科.本世纪60年代激光技术的产生,70年代低损耗光纤问世,80年代末集成光学技术的成熟,都极大地推动了光电子技术的形成和发展.

在当代社会和经济发展中,信息容量与日俱增,随着大容量和高速度的信息发展,电子学

和微电子学遇到了困难.仅就目前电子器件及其系统响应时间来看,最快也只能达到 ns 量级,而光器件响应时间则可达到 fs 量级,光频在 10^{14} — 10^{15} Hz,而且激光束的频宽可窄至 10^3 Hz,因而即使在 μm 量级的光纤内,也能承载传送大量的信息(大于 10^{12} b/s · km).因此,光作为更高频率和速度的信息载体,会使信息技术的发展产生突破.在许多领域中,凡涉及到超大、超精、超微、超功率、超高速及复杂图像的有关应用中都常常要求助于光电子技术.事实

* 1998 - 10 - 19 收到初稿,1999 - 01 - 13 修回

上,由于光电材料和元件上的突破,使得光电子技术得到广泛应用而形成了产业,并且还将成为21世纪三大新高技术产业之一。

目前,光电子技术在微波领域中的应用主要是光纤通信,并已基本普及,在雷达中的应用远不如在通信中应用那样广泛,而在我国只有少量的初步研究。随着光电子技术的迅速发展,光电子技术将在各种现代雷达中,尤其是相控阵雷达中有着巨大的吸引力和广阔的应用前景。光纤和光电集成电路用于雷达信号/数据处理、相控阵天线和多基地雷达(或雷达网)互连具有很多优点。如果说60年代以后的雷达中若不采用计算机技术就不是先进雷达,那么不妨说现代雷达如不采用光电子技术也将不是先进的雷达。下面列举光电子技术可用于现代雷达中的几个大的方面,以此说明光电子技术在这些方面应用的必要性、先进性和广阔前景。

2 光电子技术在现代雷达中的主要应用

光电子技术在雷达上的应用虽然比在光通信上的应用起步晚,但在国外应用还是比较广泛的,海湾战争中已有充分表现。这方面的应用主要有雷达信号的光纤传输、光信息处理和微波器件的光控制等。

2.1 光纤链路(FOL)用于雷达信号传输

光纤链路由激光二极管、调制器、光纤和光敏二极管等组成。它将雷达微波信号调制到光波上,利用光纤进行微波信号模拟传输,在国外已经成熟并得到广泛应用^[1]。利用光纤来传输雷达信号具有明显的优越性,因为在整个雷达

频率上,光纤传输损耗几乎比同轴电缆和波导低3个数量级,并且在整个频段内其损耗对于任何调制信号都相同(见表1),这非常有利于雷达系统的远程控制和雷达信号的传输分配。由于雷达天线是一个辐射源,极易受到反辐射导弹的袭击,所以天线和控制中心应尽量远离。常规连接方法是采用同轴电缆,它的传输损耗大,使得天线和指令中心的间距很短。同时电缆向外的辐射性也给了导弹以攻击的目标。再者,电缆的耗铜量随频率的平方根而增大,在微波信号通过同轴电缆传输前,往往就必须先将其下变频到MHz范围,而且还需要几个线路放大器以放大信号电平。然而如采用光纤链路,则微波信号传输到指令中心就毋需任何下变频,又由于光纤衰减极小,因此不需要任何线路放大器以提高信号电平。光纤及大量光波器件均为介质材料,无电磁辐射,隐身性能好,改用光纤传输系统后,不仅重量和成本大大下降,而且抗电磁干扰(EMI)和抗电磁脉冲(EMP)的能力显著提高。因此用光缆取代电缆传输,对实现雷达天线远程化是非常理想的,这不仅对战术雷达和人员的可生存性具有重大军事价值,而且也具有重大的经济效益。例如,在TPS-43雷达的研制中,花了80万美元研制成5000磅的微波系统,才使雷达天线与控制中心的距离扩大到5英里,而Westinghouse电气公司改用光纤传输系统后,只花了12万美元,重量仅840磅。美国Harris公司、ITT公司和TRW公司等相继研制成雷达天线远程化用的微波光纤传输系统,成功地用于AN/TPS-32,AN/ASR-78,AN/TPS-59等雷达中。

表1 各种信号处理器件的性能

性能/器件	光纤延迟线	ASW延迟线	CCD延迟线	同轴线延迟线	金属波导	MSW	SDL
延迟时间	5—50μs/km	几百μs	1s				
<i>T·B</i>	10 ⁴ (多模) 10 ⁶ (单模)	10 ⁵	10 ⁵				
工作频率	>100GHz (1km间隔)	几百MHz	10—20MHz			2—12GHz	20GHz (铌导线)
RF信号单位延时的损耗	0.4dB(1GHz) 0.4dB(10GHz)	1dB(1GHz) 100dB(10GHz)		35dB(1GHz) >500dB(10GHz)	30dB (10GHz)		

另外,由于光纤具有体积小、重量轻、柔软灵活等优点,特别适合用于机载、星载雷达等有空间限制的场所.光纤还具有极宽的带宽,有利于宽带雷达信号的传输.

2.2 光纤延迟线(OFDL)用于雷达信号处理

由激光器、调制器、光纤、开关和光电探测器构成的光纤延迟线是微波频域或时域信号处理的新型器件.使用光纤延迟线可构成编码发生器、脉冲解码器、带通滤波器、低通滤波器、横向匹配滤波器、相关器、卷积器、A/D 变换器等信号处理器件.在雷达系统中,特别是在那些要求产生和处理带宽极宽($> 200\text{MHz}$)信号的雷达系统中,这种器件更有潜在的重要用途.尽管声表面波器件在较低频率上呈现出优异的性能,但其带宽被限制在 $1\text{--}2\text{GHz}$.要想在 10GHz 或大于 10GHz 带宽的高数据速率上进行信号处理,使用现行的信号处理器件就显得无能为力,例如宽带雷达信号实时处理就是一个例子.

高分辨雷达接收机和电子情报(ELINT)搜索系统需要低成本和大时间带宽积($T \cdot B$)的信号处理器件.常规的方法是采用同轴电缆或体声波器件,前者的传输时延约为 5ns/m ,总延时一般为 $200\text{--}300\text{ns}$;后者如 LiNbO_3 声波器件可延时约 $5\mu\text{s}$.光纤延迟线具有比常规电子学、声表面波(ASW)、电荷耦合器件(CCD)延迟线、静磁波(MSW)及超导延迟线(SDL)更加优异的性能(见表1).

采用单模石英光纤作为延迟介质可获得 $5\mu\text{s/km}$ 的延时和 10^6 的延时带宽积.由于光纤延迟线可得到所需的任何延时,且具有高的工作频率、最大的 $T \cdot B$ 值,并具有与频率无关的恒定单位延时损耗、轻柔、绝缘性好、成本最低等突出优点,具有现今各种延迟线最优异的综合性能.因此利用光纤延迟线(包括光纤延迟线网络)和以光纤延迟线为基本构件的信号处理器件是很有发展前途的.

光纤延迟线的最大应用市场在雷达系统,特别是相控阵天线系统^[2-4]和雷达信号处理系统.它可用作相控阵雷达天线的宽带光纤时

延网络、高分辨雷达的伪随机程序发生器、海洋卫星雷达、自适应雷达天线阵的分支延迟线滤波、雷达系统性能评价测试、雷达告警接收机、电-光 A/D 变换器、脉冲间积累用延迟线、宽带非相干动目标显示(MTI)、电子战中的欺骗干扰机,以及光纤延迟线信号处理器件与高速通信系统的直接对接等,具有广阔的应用前景和巨大的经济价值.

2.3 相控阵雷达波束的光控制^[5,6]

新一代的相控阵雷达系统需要数千个有源单元以形成跟踪所需的尖锐波束.这些阵列的波束控制是通过电子调控方法快速地改变辐射单元的相对相位来实现的,其中最关键的器件就是能提供每个单元相位控制的电子移相器.传统的移相器有二极管和铁氧体移相器,其中二极管移相器的工作频率低于 10GHz ,铁氧体移相器的工作频率可以较高.这些移相器体积大,损耗大,线性度及相位连续控制特性差,对相位的控制一般是阶跃型的.如果通过光学方法,即采用一个带 MMIC(微波单片集成电路)移相器数字指令的光纤链路或用光纤进行射频功率分配和相移来完成,其性能比前者要优越得多,例如可以对微波相位进行线性连续控制,大大减小移相器体积、重量及损耗,用小功率光学器件代替大功率微波器件,大大提高了波束控制的灵活性.另外,在一个大的相控阵天线中各个 MMIC 收发模块相互间是独立的,必须与一个主振荡器同步,以使其辐射相干组合,并在自由空间形成单一波束,可将各模块中的从属振荡器注入锁定于主振荡器以实现同步.通常的方法是采用同轴电缆,若改用光纤链路载送参考信号,将大大减小其体积和重量.

雷达系统光控制的主要内容是光控微波器件,主要是通过光与微波半导体的互作用实现对微波半导体的控制,特别是对异质结半导体(如 GaAlAs/GaAs 等)的控制.这些异质结半导体结构可与 MMIC 制作在一起,可制作成开关比达 60dB 的光控开关或矩阵开关,动态范围大于 20dB 的光控衰减器,动态范围可达 20dB 的光控增益放大器等.

3 结语

光电子技术在雷达中的应用远不止上述这些,限于水平与篇幅,很多具体内容和技術尚未提及,但我们已经可以看出光电子技术在国民经济和国防建设中所能起到的巨大作用。

把光电子技术引入到传统的微波技术领域,具有重大的变革意义。自 80 年代以来,国际上已有专门的学术会议讨论该方面的研究工作,我国也已有一些单位开始进行探索研究。随着研究工作的不断深入,光电子技术与微波技术的融合必定大有发展前途。可以预见,在 21 世纪的雷达系统中,先进的光电子器件、集成光学器件将取代纯电子器件,雷达的战术性能将有质的飞跃,光电子技术在雷达中的应用前景是十分广阔的。光电子技术广泛应用带来的根

本性变革所产生的巨大经济效益是不可估量的。

致谢 作者曾受到姚诗凯博士和殷连生、廖先炳等先生的指教,文中还引用了他们及其他专家学者的著述,借此一并表示由衷的感谢!

参 考 文 献

- [1] Levine A M. U. S. Patent ,1977 ,4028702
- [2] Goutzoulis A, Davies D, Zomp J *et al.* Appl. Opt. , 1994 ,33 :8173 —8185
- [3] Toughlian E D, Zmuda H. J. Lightwave Technol. , 1990 ,8 :1824 —1828
- [4] Goutzoulis A, Zomp J, Johnson A. J. Lightwave Technol. ,1996 ,14 :2499 —2505
- [5] Dolfi D, Joffre P, Antoine J *et al.* Appl. Opt. , 1996 , 35 :5293 —5300
- [6] Freitag P M, Forrest S R. IEEE Microwave Guided Wave Lett. ,1993 ,3 :293 —295

1999 年第 9 期《物理》内容预告

庆祝建国 50 周年

漫谈物理学的过去、现在和未来(冯端);
我国半导体物理研究新进展(夏建白 黄昆);
晶界弛豫研究 50 年(葛庭燧);
我国原子分子物理研究进展(邹宇 钟志萍 李家明);
我国粒子物理研究进展(戴元本 顾以藩);
我国加速器发展概况(方守贤)。

研究快讯

量子态的概率克隆和认证(段路明 郭光灿)。

物理学和经济建设

表面科学技术在空间的应用(达道安 崔敬忠);

实验技术

低能单色正电子束装置的原理、研制及应用(王天民等)。

前沿和动态

1997 年度物理学成果精粹() (张端明 张敏 蔡永耀等摘译)。