

光控相控阵雷达发展动态和实现中的关键技术

何子述¹, 金 林², 韩蕴洁², 严济鸿¹

(1. 电子科技大学, 四川成都 610054; 2. 南京电子技术研究所, 江苏南京 210031)

摘 要: 本文讨论了光控相控阵雷达的原理和发展现状, 介绍了光控技术在宽带宽角扫描相控阵雷达中的应用和优点, 详细阐述了不同光实时延迟线 (OTID) 的主要构成原理和技术特点, 讨论了雷达微波信号的光调制技术和探测技术现状, 指出了光控相控阵雷达技术可能的应用方向. 文中重点讨论了光控相控阵雷达实现中需解决的关键技术, 包括总体设计方案中的系统指标分配, 雷达阵面结构设计时光器件温度特性的考虑, 微波信号光纤传输中的幅相一致性、动态范围、非线性相位等, OTID 设计加工中的波束切换时间、插入损耗、隔离度、延时精度等. 针对 OTID 加工中难免存在的加工误差, 文中提出了子阵 OTID 与阵元移相器联合波控的方法.

关键词: 光实时延迟线; 光控相控阵雷达; 宽带相控阵天线; 光开关; 微波光子学

中图分类号: TN971.2, TN911.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2191-05

Development and Implementation Techniques of Optically Controlled Phased Array Radar

HE Zi-shu¹, JIN Lin², HAN Yun-jie², YAN Ji-hong¹

(1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

2. Institute of Nanjing Electronic Techniques, Nanjing, Jiangsu 210031, China)

Abstract: The principle and the technical development of optically controlled phased array radar are discussed. The applications and the advantages of the optical electronic techniques in wideband and wide scanning angle phased array radar are introduced. The structure principles and the features for different types of OTID's (Optical True Time Delay) are presented in detail. Also, the optical modulation and detection techniques involved in radar microwave signal transmission are discussed, and the possible applications of optically controlled phased array radar techniques are pointed out. Finally, some implementation techniques for optically controlled phased array radar, such as the rational sub-system parameter assignment, the consideration for optical device temperature performance in array architecture designing are discussed. The efficient optical transmission link must be designed carefully so as to get identical amplitude and phase responses, high signal dynamic range, low nonlinear phase distortion. In the OTID fabrication, the beam switching time, insert loss, crosstalk, time delay error must be considered seriously. To solve the problem of OTID fabrication error in system level, the idea of joint beam steering controlling in sub-array and antenna element are proposed.

Key words: optical true time delay; optically controlled phased array radar; wideband phased array antennas; optical switch; microwave photonics

1 引言

在现代战争中, 为了提高相控阵雷达对目标的分辨、识别能力和解决目标的雷达成像问题, 要求雷达具有大的瞬时信号带宽. 同时, 为减小雷达信号被截获的概率和降低反辐射导弹的威胁, 通常采用具有大瞬时带宽的扩谱信号. 但是, 基于移相器的相控阵雷达在进行宽角扫描时, 由于渡越时间和孔径效应, 使得信号的瞬时带宽受限^[1-3].

为了实现相控阵雷达的宽带宽角扫描, 应该用实时延迟线 TTD (True Time Delay) 取代常规相控阵雷达中的移相器, 但

因数量太多给工程实现带来困难. 折衷的方法, 是在相控阵雷达的子阵级上引入 TTD 进行延时补偿. 传统的 TTD 是由波导或同轴电缆构成的, 对一个口径 20m 大型相控阵天线, 在扫描角为 60° 时, TTD 的长度约为 17m, 如此长的波导或同轴电缆, 无论是对宽带信号的传输损耗还是工程实现, 都将带来不便^[4].

如果将微波信号调制在光纤上, 用光纤作为 TTD, 称为 OTID (Optical True Time Delay), 由于光载波频率极高, 信号带宽相对光载波频率极小, 线路具有稳定的传输特性. 同时将使系统重量减轻, 体积减小, 无相互辐射干扰^[5-8].

收稿日期: 2004-09-21; 修回日期: 2005-07-21

另外,在整个雷达频段上,光纤传输损耗比同轴电缆和波导传输低得多,且对于所有频率信号损耗均相同,这非常有利于雷达系统的远程控制和雷达信号的远程传输分配。由于雷达天线是一个辐射源,极易受到反辐射导弹的袭击,所以天线和雷达主机应尽量远离,传统的连接方法是采用同轴电缆,它的传输损耗大,使得天线和雷达主机间距很短,同时电缆的向外辐射也可能成为导弹攻击的目标。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,抗电磁干扰(EMI)和抗电磁脉冲(EMP)的能力强。由于雷达主机远离天线,极大地提高了雷达和操作人员的生存能力^[9-13]。

2 光控相控阵雷达技术现状

光控相控阵雷达基本工作原理(发射模式)如图1所示,宽带微波信号经电光变换(E/O),光隔离,由1:M光分配器将光信号分为M路(对应M个子阵),每子阵信号经可控光延迟(OTID)后,经光纤传输到天线阵面前端,再经光电变换(O/E),恢复为微波信号,经放大后,通过1:N功率分配器(每子阵N个阵元),传送到N个T/R组件,经移相后从N个天线辐射出去,在空间实现功率合成。光控相控阵雷达接收工作模式与发射类似,只是信号传输方向相反,最后各子阵信号合成接收波束。

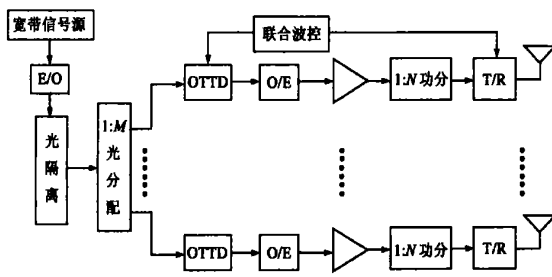


图1 光控相控阵基本原理图(发射工作模式)

自上世纪80年代末以来,随着微波信号光调制技术和半导体光电子集成电路技术的迅猛发展,人们提出了将信号的光纤传输与光电子技术应用于相控阵雷达的构想,经过近20年的发展,对光控相控阵雷达技术的研究已经覆盖了从L波段到毫米波的整个雷达工作频段,下面对主要实验系统进行简要介绍。

在L波段的实验系统中,典型者有休斯公司1995年研制的L波段共形阵^[9],中心频率 $f_0 = 1125\text{MHz}$,带宽为25%,分为4个子阵,每子阵6个T/R单元,在子阵级用一个5位OTID,每个T/R组件内用6位移相器。该实验系统第一次在系统级上验证了用光控技术可实现相控阵雷达的宽带宽角扫描。该系统的不足之处是,由于受当时器件水平的限制,其OTID的构成十分复杂,每个OTID用了4只激光器,一个 4×8 耦合器及一个由8个探测器组成的可控探测器组件。

1996年,普林斯顿大学对C波段(5GHz)的光控相控阵技术进行了实验,并给出了一种基于多光载波频率的激光器阵的OTID实现方案^[14]。

1997年,由瑞典国防研究院和爱立信公司共同完成了一个S波段的光控相控阵雷达实验系统^[15],结果表明,对3GHz

的S波段微波信号,光纤链路的噪声系数为3dB,动态范围可达 $104\text{dB/Hz}^{2/3}$ 。

在现役雷达系统中进行信号的光纤链路实验并取得成功,美国海军实验室于1998年在海用AN/SQ-9B ADM雷达上完成的光传输实验应该是第一次^[16]。实验系统由旋转天线、收发单元、低噪声放大等组成,系统工作于X波段。实验结果表明,在AN/SQ-9B ADM雷达中引入光纤传输和分配方案,其相位噪声、SNR等诸多指标完全满足系统要求。

同样是美国海军实验室,于1999年将光传输分配技术用于Ka波段(26.5~40)GHz相控阵天线实验系统^[17],并用基于色散棱镜的OTID实现了在 $-60^\circ \sim +60^\circ$ 角度范围内波束扫描指向无偏斜。所采用的实验用光器件都是商用可购买到的。

另外,2002年美国微电子研究中心和德克萨斯大学共同研制出了适用于K波段(18~26.5GHz)的OTID单元^[18],控制位为6位,延时时间为 $0 \sim 443\text{ps}$ 。该OTID与相控阵天线集成为一体。

2004年,韩国Soongsil大学完成了一个基于光微电机系统(MEMS)的X波段8阵元光控相控阵雷达实验系统,实验系统的3位OTID延时精度达 $0.2\text{ps}^{[19]}$ 。

3 光实时延迟线(OTID)的实现方法与技术现状

前已述及,为实现相控阵雷达的宽带宽角扫描,应在相控阵雷达中采用TID,通常为简化设备,实用中常在子阵级上采用TID,而在T/R组件内仍用移相器。基于光传输的OTID具有低损耗、低色散、重量轻、体积小、不受电磁干扰等优点。目前,实现OTID的技术途径有如下几种。

(1) 基于电切换和光纤环的OTID

该OTID采用电开关切换,使RF信号调制到不同的激光器从而经过不同长度的光纤,实现不同的延时。该方案在休斯公司的实验系统中曾使用^[9]。特点是结构复杂,造价昂贵,插损大。

(2) 基于光开关切换和光纤环的OTID

该方案是用光开关对光路进行切换,结构类似基于PIN管的移相器^[8,20-22],该类OTID的延时完全由光纤长度决定,理论上延时可以任意长,其它指标,如切换时间、隔离度、插入损耗等主要由光开关决定。因此光开关性能是该类OTID技术性能的关键。

(3) 基于集成光学OTID

该方案是将光切换开关和延时部件(或光波导)集成于同一OMMIC基片上,由于体积小,其最大延时通常较小(几百ps),因此该OTID适用于频率较高的场合或单元移相器^[23,24]。

(4) 基于空间光路切换的OTID

该类OTID原理是通过一系列的可控反射镜,改变光在空间反射的次数,使光经过不同的光程,实现不同的延时,该类OTID结构较复杂^[17,25]。

(5) 基于可调谐激光器和光传播色散的OTID

该类OTID的基本工作原理是,改变可调谐激光器(Tunable Laser)的光波频率,产生不同频率的光载波,光经过具有

色散特性的光纤、光栅棱镜或 Bragg 栅实现不同的延时^[26,27]。

对大型相控阵雷达,由于阵面口径大,需进行的延时补偿较长,如对 20m 口径天线的 L 波段相控阵雷达,在扫描角为 60° 时,其对应的最大延时电长度为 17m。因此采用基于光开关切换和光纤环的 OTID 是合适的选择。

由于受数字光通信中全光交换技术的牵引,近年来随着光电子和集成光学技术的发展,高速高性能光开关研究取得重大进展^[28],目前光开关在插入损耗、隔离度、切换速度、温度特性、及可靠性等方面已接近或基本满足相控阵雷达的技战术要求,预计二、三年内将完全满足相控阵雷达的要求。

4 微波信号的光调制与检测器件技术现状

光控相控阵雷达技术的另一重要部件是微波信号的电光变换和光电变换,电光变换可分为半导体直接强度调制激光器(Semiconductor Laser for Direct-Intensity Modulator)和外调制器(External Intensity Modulator),光电变换由光探测器(Photo-Detector)完成。

目前,国外光探测器的频率可达 520GHz,直接调制激光器的频率可达 40GHz,外调制器的频率可达 70GHz 或更高,其技术水平为下表所示。可以看出,目前光电变换和电光的变换的频率已覆盖了直到毫米波的整个雷达工作频段^[29~32]。如表 1 所示。

表 1 光调制与光探测器技术指标

器件类型	最大效率	3dB 带宽
探测器:表面照射型	0.94A/W	375GHz
边缘照射型	0.84A/W	520GHz
直接强度调制半导体激光器:VCSEL 型	0.61W/A	36GHz
FP 边缘辐射型	0.38W/A	40GHz
DFB 边缘辐射型	0.44W/A	20GHz
外调制激光器:MZ 干涉型	15W/A	70GHz
电吸收型	15W/A	60GHz

5 光控相控阵雷达技术的应用前景

光控相控阵雷达技术从上个世纪 80 年代末以来,得到了广泛的研究,建立了各种波段的实验系统,但由于受器件水平和造价等因素的限制,到目前为止,采用完全光控技术的相控阵雷达实用系统尚未见正式报道。但随着光调制及其它集成光学技术的迅猛发展,该项技术进入实际工程应用是指日可见的。目前可期望使用光控技术的领域有:

(1) 大型战略预警相控阵雷达系统

大型 L 波段战略预警相控阵雷达系统(相当于 AN/FPS-108)^[4],阵面口径 29m,为了实现约 200MHz 的带宽(频率范围 1215~1400MHz),将阵面的 15360 个有源阵元分为 96 个子阵,每个子阵上采用实时延迟。如果在该类雷达中采用光控技术,则可用 OTID 取代电缆延迟线,并可将阵面与雷达主机分置数公里以外,以提高雷达和人员的生存能力。

(2) X 波段大型相控阵雷达系统

X 波段大型有源相控阵雷达^[33],如美国的 CBR,阵面口径 123m²,阵面的 16896 个阵元被分为 72 个子阵,在子阵级采

用延时单元(TDU),最大电扫描角度 25°。可在子阵级采用 OTID,并用光纤实现信号的传输分配。

(3) 舰载光控相控阵雷达系统

美国中央 Florida 大学与马丁公司设计的舰载光控相控阵雷达系统方案^[34]。该系统由 2300 个独立的 OTID 构成,每个 OTID 的控制位为 7 位,每个子阵由 8 个单元构成。天线分系统与雷达主机由光纤连接,远距离分置。

(4) 机载共形相控阵雷达

在机载(或舰载)共形相控阵雷达系统中,由于阵面的不规则性,使得阵元和信号处理机间距离较大,采用光纤传输将在信号损耗、减小体积、减轻重量、防电磁干扰及电磁外辐射等方面获得好处^[35]。

(5) 电子侦察中的宽带/超宽带相控阵接收机

在电子侦察系统中,接收机通常都是宽带的,如果要用相控阵天线对信号进行接收,则采用 OTID 作为波控延迟线是最好的选择,因信号带宽相对光载波而言总是窄带的。

6 光控相控阵雷达实现中的关键技术

近十多年来,光电子技术和信号的光纤传输技术得到了较快的发展,使光控相控阵雷达技术逐步进入实用成为可能。但是,相对于数字光纤传输而言,模拟微波信号的光纤传输研究相对较少,特别是相控阵雷达对信号传输的一致性要求较高,对信号传输的相噪、噪声系数、带内平坦度、非线性相位(群时延)、动态范围等指标要求严格。因此,将光电子技术和信号光纤传输技术用于相控阵雷达,尚有下面一些关键技术值得研究。

(1) 光控相控阵雷达总体技术

进行总体设计时,应首先考虑雷达需达到的技战术指标,如扫描范围、瞬时带宽、距离分辨率、测角精度、波束切换时间、接收灵敏度、接收信号动态范围、适应环境等。然后结合微波信号光纤传输动态范围等指标,完成雷达系统的子阵划分、指标计算、指标分配。特别应关注光路信号传输的灵敏度与雷达系统灵敏度的协调,光路引入插损对系统噪声系数的影响等。

(2) 光控相控阵雷达结构设计

在光控相控阵雷达中,天线前端与信号处理和控制中心间采用光纤传输,由于天线前端通常置于室外,环境恶劣。因此需对天线前端结构进行精心设计,使光传输分配链路中的调制器、探测器、OTID 等不受环境温度变化的影响,处于稳定工作状态。根据笔者进行的高低温实验结果表明,光探测器、OTID、光纤等在 -40~50 范围内性能较稳定,具有温控功能的 DFB 激光器尽管其性能也较稳定,但其控温电流在高低温时,将达数百毫安,在实际系统设计时,这是需认真对待的一个问题。

(3) 微波信号的光传输与分配网络设计

相控阵雷达正常工作的基础,是各收发阵元间信号传输特性的高度一致性,微波信号的光调制、耦合、分配、及检测放大等均应保证有稳定的传输特性,同时应满足系统对信号相位噪声、非线性相位(群时延)、幅频特性、动态范围、及 SNR

等的要求.

(4) OTID 模块及外围控制设计

OTID 是光控相控阵雷达的关键部件,设计时应根据雷达工作波段选择一种合适的结构形式,前文已介绍,基于光开关和光纤环的 OTID 是一种可行的选择,在设计时应满足系统对波束切换时间、插入损耗、隔离度、噪声系数、一致性、延时重复性、延时精度等的要求.根据笔者的体会,上述指标中的大多数由光开关性能决定,而延时精度则由加工时的光纤长度决定.

(5) 光控相控阵雷达子阵 OTID 和单元移相器的联合波控技术

由于 OTID 在加工时,总是存在加工误差,该加工误差随雷达工作波长的不同将引入不同的相位差,对 30ps 的延时误差 L 波段(1.3GHz)对应的相位差是 14°,而 X 波段(10GHz)对应的相位差是 108°.因此波控机在进行波束指向控制时,应同时对 OTID 和移相器进行联合控制,OTID 中固有的加工误差可在移相器中进行补偿,以实现波束指向的精确控制.这便降低了实际工程中对 OTID 加工精度的要求,使其更易工程实现.

7 结束语

本文对光控相控阵雷达相关问题进行了讨论,可以看出,光控相控阵雷达经过近 20 年的发展,各种实验系统已覆盖从 L 波段到毫米波的整个雷达工作波段,在波控技术、微波信号的光调制和光传输、OTID 等技术领域已取得实质性进展,但目前尚未见到光控相控阵雷达实际应用的正式报道.这是因为光控相控阵雷达技术在具体工程实现时,还有些问题需解决,诸如稳定的微波信号光纤传输技术,适应宽温度范围的光电子器件和部件,高切换速度、低插损、低串扰的 OTID 模块等.当然成本和造价也是影响光控相控阵雷达应用的一个原因,同普通电子元器件相比,光器件通常较昂贵.但是,随着集成光学等光电子技术的发展,实现中的技术问题已可望解决,随着应用市场的明朗化和生产的批量化,器件的价格也将降低.

参考文献:

- [1] 张直中.论宽带相控阵雷达的战术优越性[J].电子学报,1993,21(3):86-91.
Zhang Zhi-zhong. Tactical advantages of quasi-wide-band phase array radar[J]. Acta Electronica Sinica,1993,21(3):86-91. (in Chinese)
- [2] 张光义.相控阵雷达瞬时带宽的几个问题[J].现代雷达,1990,4:1-10.
- [3] 郑学誉,万长宁.宽带宽角扫描相控阵天线[J].电波科学学报,1995,10(6):33-38.
Zheng Xue-yu, Wan Chang-ning. Scanning phased array antenna with broadband and wide angle[J]. Chinese Journal of Radio Science,1995,10(6):33-38. (in Chinese)
- [4] 张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,1994.323-334.
- [5] 蒋跃.现代雷达中的光电子技术[J].物理,1999,28(8):490-493.
Jiang Yue. Applications of optoelectronic Technology in advanced radar[J]. Physics,1999,28(8):490-493. (in Chinese)
- [6] Roselli L, Borgioni V, Zepparelli F, et al. Analog laser predistortion for multi-service radio-over-fiber systems[J]. Journal of Light Wave Technology,2003,21(5):1211-1223.
- [7] Dolfi D, Joffre P, Huignard J P, et al. Experimental demonstration of a phased-array antenna optically controlled with phase and time delays[J]. Applied Optics,1996,35(9):5293-5300.
- [8] Kaman V, Zheng X Z, Helkey R J, et al. A 32-element 8-bit photonic true-time-delay system based on a 288 × 288 3-D mems optical switch[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2003,15(6):849-851.
- [9] Lee J J, Loo R Y, Livingston S, et al. Photonic wideband array antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,1995,43(9):966-982.
- [10] Alam M F, Atiqzaman M, Duncan B B, et al. Fiber-optic network architectures for on-board radar and avionics signal distribution[A]. IEEE International Radar Conference [C]. USA Piscataway:Dayton University,2000.545-550.
- [11] Birkmayer W, Schäffer C, Hösselbarth B. Scenarios and system architectures advantageous for optical technologies in phased array antennas[A]. Optoelectronic Signal Processing for Phased-Array Antennas II[C]. Munchen-Ottobrunn, West Germany:MBB Space,1990.14-25.
- [12] Sparks R A. The application of photonics to radar:A system designer's perspective[A]. IEEE, SBMO/IEEE MTT-S F-MOC '95 Proceedings [C]. Lexington, MA, USA:ANRO Eng Inc,1995.717-724.
- [13] Niehenke E C, Grumman N, Herczfeld P. An optical link for w-band transmit/receive applications[A]. IEEE MTT-S Digest[C]. Northrop Grumman, Baltimore, MD, USA: Electronic Sensors & Syst Div,1997.35-38.
- [14] Forrest S R, Taylor R B. Optically controlled phased array radar[A]. Microwave Photonics,1996. MWP '96. Technical Digest. 1996 International Topical Meeting[C]. Princeton Univ. NJ, USA:Dept of Electr Eng,1996. (12):193-196.
- [15] Nnegren J ö, Alping A. A high performance fiber optical S-band radar link[A]. Microwave Photonics,1997. MWP '97, International Topical Meeting [C]. Linköping, Sweden: Nat Defence Res Establ,1997, (9):13-14.
- [16] Román J E, Nichols L T, Williams K J, et al. Photonic remoting of AN/SPQ-9B ADM ultra high dynamic range radar[A]. IEEE National Radar Conference[C]. Washington, DC, USA: Div of Opt Sci, Naval Res Lab,1998, (5):12-13.

- [17] Tulchinsky D A, Matthews P J, Matovelle N, et al. Fiber-optic control of a time steered millimeter-wave transmit array[A]. MWP Digest [C]. Washington, DC, USA: Div of Opt Sci, Naval Res Lab, 1999: 279 - 282.
- [18] Chen Y H, Chen R T. A fully packaged true time delay module for a K-band phased array antenna system demonstration [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14 (8) : 1175 - 1177.
- [19] Shin J D, Lee B S, Kim B J. Optical true time-delay feeder for X-band phased array antennas composed of 2X2 optical MEMS switches and fiber delay lines [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(5) : 1364 - 1366.
- [20] Cayrefourcq I, Schaller M, Fourdin C, et al. Optical switch design for true time delay array antenna [J]. IEEE Proc Optoelectron, 1998, 145 (2) : 77 - 82.
- [21] Schäffer C. Influence of crosstalk in switchable optical time-delay networks for microwave array antennas [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45 (8) : 1519 - 1521.
- [22] Galwas B A. Photonic technology for microwave engineering [A]. Microwaves and Radar, 1998. MIKON '98. 12th International Conference on [C]. Poland: Inst of Microelectron & Optoelectron, Warsaw Univ of Technol, 1998, 4(5) : 117 - 134.
- [23] Willms J G, Ouacha A, Boer L D, et al. A wideband GaAs 6-bit true-time delay MMIC employing on-chip digital drivers. TNO Physics and Electronics Laboratory [EB/OL]. www.tno.nl/instit/fel/os/resources/GAAS2000.6bit.TID.pdf, 2000 - 7 - 14.
- [24] Fetterman H, Han J, Zhang H, et al. Multiple output photonic RF phase shifters for optically controlled radar systems [A]. IEEE MTT-S Digest [C]. Los Angeles, CA, USA: Dept of Electr Eng California Univ, 2002. 1937 - 1940.
- [25] Etem Y, Lewis F. Design, performance of an optically controlled phased array antenna [A]. Microwave Photonics, 1996. MWP '96. Technical Digest. 1996 International Topical Meeting [C]. Malvern, UK: DRA, 1996, (12) : 209 - 212.
- [26] Jalali B and Yegnanarayanan S. Optically controlled phased-array antenna using wavelength selective true time delay [A]. Phased Array Systems and Technology, Proceedings. 2000 IEEE International Conference [C]. Los Angeles, CA, USA: Dept of Electr Eng California Univ, 2000, (5) : 367 - 370.
- [27] Tulchinsky D A, Matthews P J. Ultrawide-band fiber-optic control of a millimeter-wave transmit beamformer [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49 (7) : 1248 - 1253.
- [28] Georgios I P, Chrisoula P, Andreas S P. Optical switching: Switch fabrics, techniques, and architectures [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21 (2) : 384 - 405.
- [29] Vieira A J C, Barros J L E M, Herczfeld P R, et al. Millimeter wave over fiber-a new approach [J]. (Antennas and Propagation Society International Symposium. 1997) IEEE, Digest, 1997, 2(7) : 774 - 777.
- [30] Seeds A J. Microwave photonics [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3) : 877 - 887.
- [31] Ackerman E I, Cox C H. RF fiber-optic link performance [J]. IEEE Microwave Magazine, 2001, 2(4) : 50 - 58.
- [32] Charles C, Edward A, Roger H, et al. Techniques and performance of intensity-modulation direct-detection analog optical links [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45 (8) : 1375 - 1383.
- [33] Sarcione M, Mulcahey J, Schmidt D, et al. The design, development and testing of the THAAD (theater high altitude area defense) solid state phased array (formerly ground based radar) [A]. Phased Array Systems and Technology, 1996, IEEE International Symposium [C]. Sudbury, MA, USA: Raytheon Electron Syst, 1996. 10: 260 - 265, 15 - 18.
- [34] Riza N A, Photonic signal processing for antennas. Photonic Information Processing Systems (PIPS) Laboratory, University of Central Florida, Orlando [EB/OL]. FL, 2000, www.darpa.mil/mto/aosp/workshop/riza.pdf, 2000 - 12 - 08.
- [35] Dolfi D, Mongardien D, Tonda S, et al. Photonics for airborne phased array radars [A]. Phased Array Systems and Technology, Proceedings IEEE International Conference [C]. Thomson-CSF, Orsay, France: Central Res Lab, 2000, (5) : 379 - 382.

作者简介:



何子述 男, 1962年10月生于四川新都, 信号与信息处理专业博士, 电子科技大学电子工程学院教授、博士生导师, 先后完成雷达信号处理、通信信号处理等方面的研究课题 10 余项, 其中获省部级科技进步奖 3 项, 发表学术论文 30 余篇。目前主要从事相控阵雷达技术、宽带 MIMO 数字阵雷达技术、第 4 代移动通信中的空时编码及信道估计等方面的研究工作。E-mail: zshe@uestc.edu.cn.

金林 男, 1965年10月生于江西永修, 研究员, 博士, 1989年2月研究生毕业于北京航空航天大学电子工程系, 目前从事雷达微波天线的工作, 作为主要参加者研制成功的《机械预警超低副瓣波导裂缝天线》, 1994年获电子部科技进步特等奖、1995年获国家科技进步二等奖, 发表论文 10 余篇。