

# 基于光纤波分复用的时频信号分发传输技术

陈凌

(中国西南电子技术研究所,四川 成都 610036)

**摘要:**在数字相控阵中为保证多通道之间信号合成效率,需要系统为相控阵的多个子阵提供高稳定的时频信号。传统相控阵采用电缆直接分发传输的方法存在幅相一致性差的问题。提出了一种基于光纤波分复用的时频信号分发传输技术,可有效解决数字相控阵中时频信号高效稳定分发传输问题,分发传输后的各支路信号幅度随温度变化在±0.5 dBm之内,相位随温度变化在±3°之内。该时频信号分发传输技术已经成功应用于某数字相控阵多目标统一测控系统。

**关键词:**数字相控阵;波分复用;时频信号光分发传输

中图分类号: TN914

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.222989

中文引用格式: 陈凌. 基于光纤波分复用的时频信号分发传输技术[J]. 电子技术应用, 2022, 48(8): 90–94, 100.

英文引用格式: Chen Ling. Time-frequency signal distribution and transmission technology based on optical fiber WDM[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(8): 90–94, 100.

## Time-frequency signal distribution and transmission technology based on optical fiber WDM

Chen Ling

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** In order to ensure the efficiency of signal synthesis between multiple channels in a digital phased array, the system needs to provide highly stable time-frequency signals for multiple sub-arrays of the phased array. There is a problem of poor amplitude and phase consistency in the method that the traditional phased array uses cables to directly distribute and transmit. In this paper, a time-frequency signal distribution and transmission technology based on optical fiber wavelength division multiplexing is proposed, which can effectively solve the problem of efficient and stable distribution and transmission of time-frequency signals in digital phased arrays. The amplitude of each branch signal after distribution and transmission varies with temperature within ±0.5 dBm, and the phase varies with temperature within ±3°. The time-frequency signal distribution and transmission technology has been successfully applied to a digital phased array multi-target unified measurement and control system.

**Key words:** digital phased array; WDM; optical distribution-transmission for time-frequency signal

## 0 引言

数字相控阵广泛应用在通信、射电天文、雷达、声纳、航天测控领域。多个天线子阵和多通道组成数字相控阵系统的射频前端部分,每个通道接收的信号经AD转换后在数字域进行信号合成,形成波束。信号合成时需要在同一时刻进行多通道信号幅相加权,从而获得高质量的合成信号,实现信号在天线远端波束形成精确指向功能<sup>[1-4]</sup>。为实现这个目标,系统必须为多通道提供统一的工作时钟,同时由于多通道信号之间的幅度相位存在不一致性<sup>[5-9]</sup>,系统必须进行多通道的幅相精确标校。其中时频及标校信号的传输质量直接影响信号合成功率。另外,系统还需要将本振信号分发传输到相控阵子阵完成收发信号变频功能。

传统电缆分发传输设计时把时频信号、标校信号和本振信号分别用不同的传输网络进行传输:传输时频信号时需要大量功分器和传输电缆,根据通道数不同,功分器和传输电缆数量不同,其设备数量多且复杂,线缆数量多重量大,天线子阵空间狭小不便于安装,多通道时频信号相位一致性较差;传输标校信号和本振信号时根据通道数需要大量选择开关,与传输时频信号一样,其设备组成复杂,难安装,难维护,多通道标校信号相位一致性较差。为了获得更大的天线增益和传输距离,数字相控阵系统信号通道规模越来越大,会达到成千上万个,且数字相控阵系统集成度也越来越高,迫切需要设计高效稳定的时频、标校和本振信号分发传输网络。

本文通过对时频、标校和本振信号在光纤通信中传

输技术的分析研究,提出了基于光纤波分复用<sup>[9-12]</sup>的高稳定时频、标校和本振信号的分发传输技术,该分发传输技术把时频信号、标校信号和本振信号集成在一起分发传输,解决电缆直接传输时设备组成复杂、安装不便、难维护以及多通道信号相位一致性较差等问题。该分发传输技术已经成功应用于某数字相控阵多目标统一测控系统中。为简便起见,将时频信号、标校信号和本振信号统称为时频信号。

## 1 波分复用光纤传输技术

波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术是指用光耦合器把不同波长的多个光源产生的多个光波长集中在一根光纤通道上传输,其中每个波长上调制一个信息。在接收端可以用光滤波器分别解出多个光波长。整个发射接收实现波分复用功能。WDM本质上是光域的频分复用,它具有超大传输容量、节约光纤资源、各信道传输透明扩容平滑、可实现超长距离传输等。WDM可分为稀疏波分复用(Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM)和密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)。二者的区别在于信道间隔和通带宽度不同。DWDM的信道间隔窄,一般为0.2 nm、0.4 nm、0.8 nm、1.6 nm,CWDM为20 nm和13 nm。根据现有模拟激光器、光放大器、波分复用器特性,在实际应用中一般采用CWDM和DWDM结合。

图1描述了上行3路下行1路的CWDM和DWDM相结合的单根双向波分复用光纤传输系统。其中上行光信号包含经DWDM复用的5路信号。DWDM波长为1 540~1 565 nm最佳,在1 540~1 565 nm波长内复用3路光信号符合ITU-T G.692 DWDM标准(间隔0.8 nm 100 GHz)。

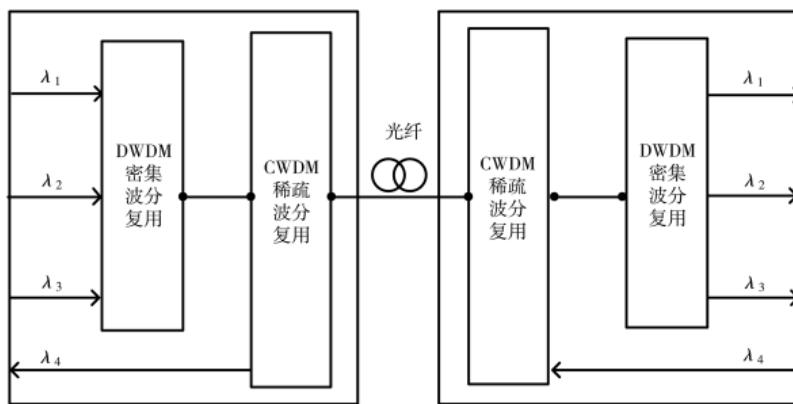


图1 波分复用原理框图

## 2 基于WDM的时频信号光传输架构设计

本文研究的数字相控阵系统规模为n个子阵,传输的时频、本振信号和标校信号包括:CLK、SYNC、收发RF信号。

为简便起见,将需要传输的CLK、SYNC、收发RF信

号统称为时频信号。待传输的时频信号为电信号,在进行光传输之前需要进行电光转换,在接收处理端需要进行光电转换成电信号后提供给子阵设备使用。其中,时频光分发传输采用波分复用单芯光纤传输技术。

时频信号基于相同的10 MHz标准频率信号产生,实践中要求各频率信号的相位变化一致性与稳定性≤±3°,其产生传输原理框图如图2所示。

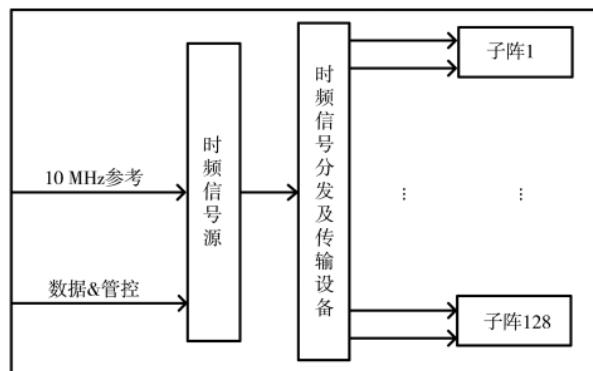


图2 时频信号在数字相控阵系统中的传输

时频信号源接收10 MHz标准频率信号作为参考信号,以10 MHz频标信号为基准产生数字相控阵系统所需的待分发传输的时频信号。时频信号需要分发传输到各个子阵,理论上各子阵在同一时频信号下进行信号接收、采样、模数/数模转换及多通道信号合成。

系统时频信号光分发传输包括上行多路和下行1路信号。采用稳相光纤把时频信号从时频信号源分发传输到n个相控阵子阵。其分发传输原理如图3所示。

时频光发射分发设备完成信号电光转换、波分复用、光分发及配相功能,主要由射频光发射模块、数字光发射模块、射频光接收模块、光放大器、波分复用器、光分路器、监控模块、AC/DC电源模块、电源滤波器等组成。

光发射/接收模块负责时频电信号的阻抗匹配、电信号放大、电/光转换,即将这3路信号转变成3个不同光波长的光信号进行光传输,上行3个不同波长的光信号经DWDM复用一根光纤输出。同时光发射/接收模块负责将下行的1路时频电信号先解复用,后经放大进行光/电转换,转换后的电信号经阻抗匹配再输出。上行的经DWDM的单根光纤信号进行光放大并与下行的1路光信号经CWDM复用为一根光纤,再经n路光功分和适配器阵列分发为n个光信号,通过n根稳相光纤分发传输至各路子阵,通过子阵上的时频处理模块完成波分复用和光电转换功能,并把各时频信号送相控阵子阵上供其他设备使用。n个时频光处理模块接收各自的一根光纤后进行CWDM解复用,分解出上行和下行光信

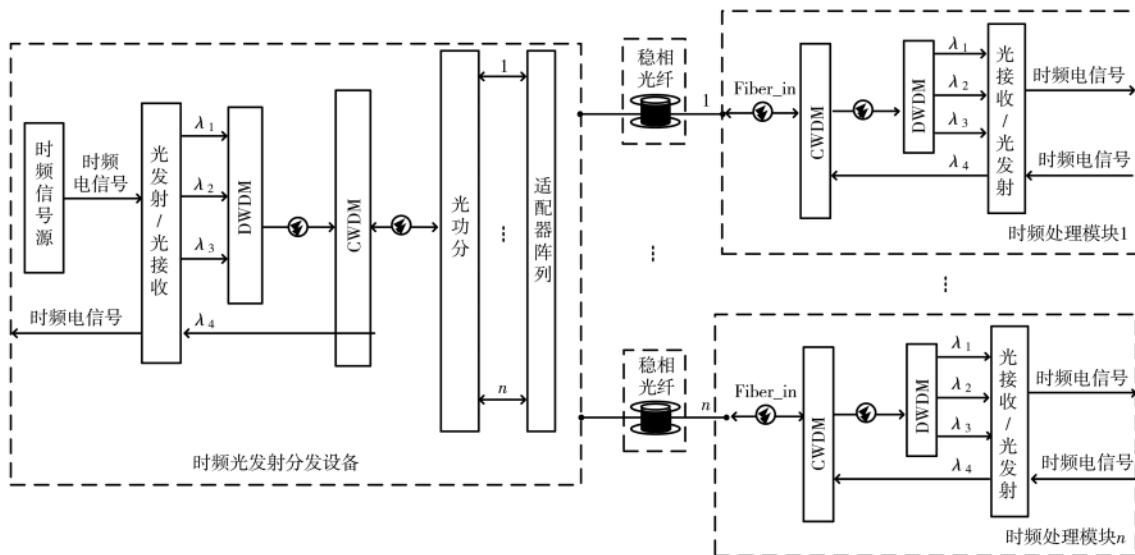


图 3 时频信号光分发传输原理框图

号。上行光信号经 DWDM 分解复用出 3 个光载波,再分别由 3 个探测器对 3 路光载波信号进行光电转换、放大滤波后恢复出上行时频信号经电信号接口输出。下行电信号电光直调进行电光转换,经光放大滤波后送入 CWDM 和上行光信号波分复用同一根光纤,通过使能信号控制上下行光信号的传输。

本文方案使用的复用信号波长如表 1 所示。

表 1 复用信号参数  
(nm)

序号	信号名称	ITU 通道	DWDM 波长	CWDM 波长	光纤
1	RF 发	CH40	1 545.32		
2	CLK	CH36	1 548.51	1 550±15	1 芯单模
3	SYNC	CH28	1 554.94		光纤
4	RF 收	-	-	1 310	

### 3 指标测试

时频信号经波分复用光纤分发传输系统处理后,信号质量方面,关注其相位噪声、相位一致性及同步信号相位一致性等技术指标。

#### 3.1 相位噪声测试

本文测试了系统分发传输的最大频率信号 2 580 MHz 的相位噪声,同时与信号源的相位噪声进行对比,得到如图 4 所示的二者的对比图。剔除掉测试仪器自身的测试不确定度后,发现偏离主频  $\leq 100$  kHz 时,波分复用光传输后的信号相位噪声与源的信号噪声保持一致,基本上没有大的恶化;在偏离主频  $\geq 1$  MHz 时,波分复用光传输后的信号相位噪声与源的信号噪声相比要差些,这是因为远端相位噪声受噪声系数影响大,在接收光功率较小时光分发传输系统噪声系数大,因此底噪较高,不过测试出来的相位噪声还是满足实践系统的指标要求的。

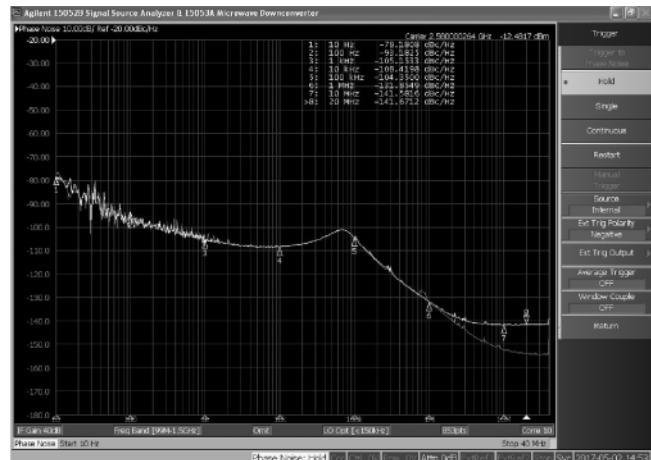


图 4 2 580 MHz 频点测试相噪与源的对比图

#### 3.2 温度幅相一致性测试

由于电光转换器是半导体热敏器件,其对温度环境变化很敏感,而相控阵系统规模越大其子阵间温度会有一定温差,这时候受温度影响,经波分复用光分发传输系统分发传输的时频信号其幅相一致性会随温度变化。选取了 3 个支路用温箱测试,表 2 记录了各支路随温度变化的幅相一致性。

由表 2 可见,各支路幅度随温度变化在  $\pm 0.5$  dBm 之内,相位随温度变化在  $\pm 3^\circ$  之内,满足实践系统的指标要求。

#### 3.3 同步信号指标测试

本时频信号光分发传输系统还分发传输了同步信号,因而也对同步信号进行了相位一致性测试以及抖动与上升沿测试。

##### (1) PPS 相位一致性测试

通过示波器测试传输后的 PPS 信号与源的 PPS 信号的相位一致性,其结果如图 5 所示,两路同步信号间的一致性指标约为 100 ps。

表 2 温度幅相一致性变化

温度/°C	支路 1		支路 2		支路 3	
	相位差/(°)	幅度差/dBm	相位差/(°)	幅度差/dBm	相位差/(°)	幅度差/dBm
15	-0.32	0.15	-0.16	0.19	0.32	0.16
20	0.08	0.1	0	0.1	0.48	0.08
25	0.16	0.01	0.32	0.01	0.96	0.02
30	-0.48	-0.08	-0.32	-0.05	0.48	-0.1
35	-0.96	-0.1	-1.12	-0.11	-1.12	-0.1
40	-1.76	-0.2	-1.76	-0.2	-1.44	-0.19
45	-2.56	-0.2	-2.72	-0.24	-2.24	-0.22
35	-0.48	-0.19	-1.44	-0.2	-1.12	-0.18
30	0.16	-0.1	-0.64	-0.12	0.48	-0.09
25	0.96	0.01	0.16	-0.01	1.76	0.01
20	1.12	0.14	0.8	0.11	1.44	0.13
15	1.44	0.2	1.28	0.16	1.76	0.21

注：与基准支路相比。

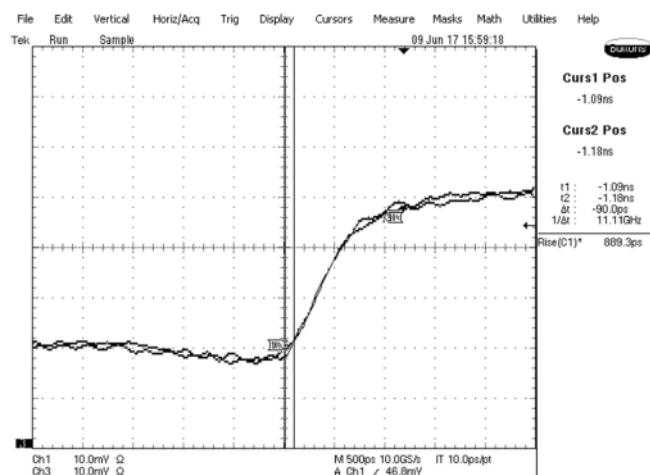


图 5 PPS 相位一致性结果

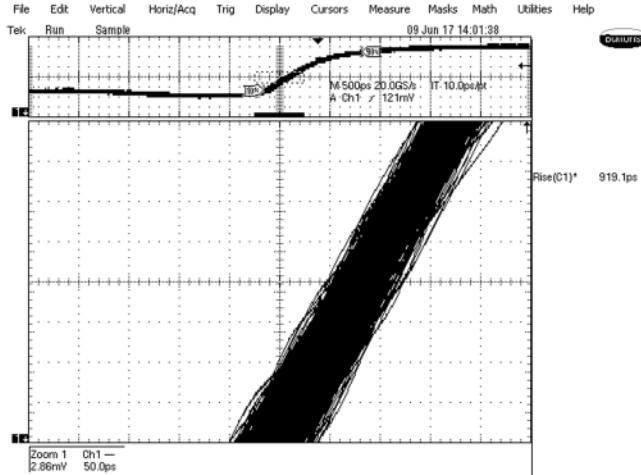


图 7 传输后 PPS 信号抖动

(2) PPS 脉冲抖动测试  
由图 6 可知，传输前信号源 PPS 抖动值为 80 ps；由图 7 可知经传输后 PPS 信号抖动值为 85 ps 左右，可见经

过波分复用光分发传输的 PPS 信号抖动恶化很小，满足指标要求。

### (3) PPS 上升沿测试

PPS 信号上升时间测试结果如图 8 和图 9 所示。

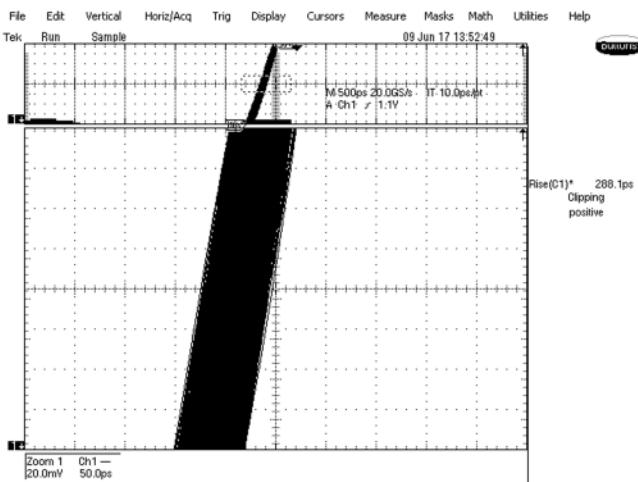


图 6 源 PPS 信号抖动

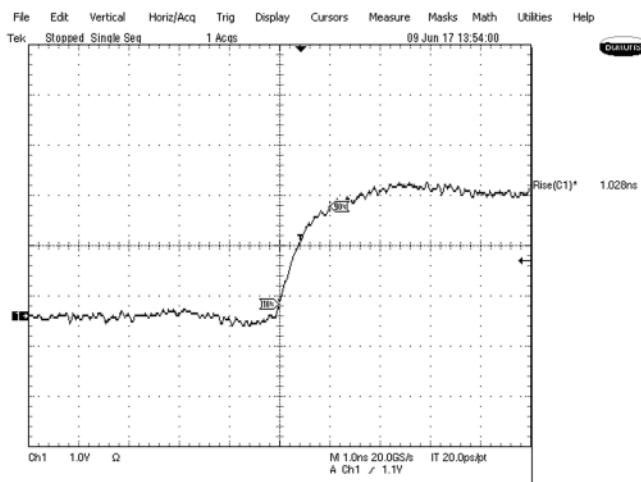


图 8 信号源 PPS 信号上升时间

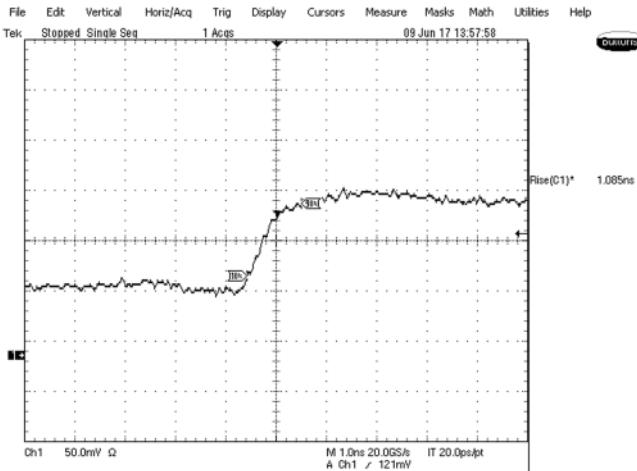


图 9 传输后 PPS 信号上升时间

图 8 是传输前信号源 PPS 上升时间, 测试值为 1.028 ns, 图 9 是经传输后 PPS 信号上升时间, 测试值为 1.085 ns, 经过波分复用光分发传输的 PPS 信号上升时间仅恶化 0.02 ns, 且在提高源质量的情况下, 传输后

PPS 上升时间还能进一步减少。

#### 4 结论

本文针对数字相控阵中系统需要为相控阵多个子阵提供高稳定的时频信号的需求, 提出了一种基于光纤波分复用的时频信号分发传输技术。实验测试数据和工程实践表明, 基于 WDM(波分复用)的单根光纤进行时频信号的光分发传输技术实现了数字相控阵高效稳定的分发传输系统时钟信号、标校信号和本振信号的功能。该分发传输技术已经成功应用于某数字相控阵多目标统一测控系统, 未来会更多应用在航天测控系统、车载测控系统等各类相控阵测控系统中。

#### 参考文献

- [1] 刘嘉兴.相控阵测控系统概论[J].电讯技术, 2005(3): 1–6.
- [2] 张光义.相控阵雷达系统[M].北京: 国防工业出版社, 2000.
- [3] 樊昌信, 曹丽娜.通信原理[M].北京: 国防工业出版社, 2010.

(下转第 100 页)

(上接第 37 页)

- 2000.
- [2] MOREIRA A, PRATS-IRAO LA P, YOUNIS M, et al. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Magazine, 2013, 1(1): 6–43.
  - [3] 吴永辉.极化 SAR 图像分类技术研究[D].长沙: 国防科学技术大学, 2007.
  - [4] 周晓光, 匡纲要, 万建伟.极化 SAR 图像分类综述[J].信号处理, 2008, 24(5): 806–812.
  - [5] ANTHONY F, STEPHEN L D. A three-component scattering model for polarimetric SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 963–973.
  - [6] 郎丰铠, 杨杰, 赵伶俐, 等.基于 Freeman 散射熵和各向异性度的极化 SAR 影像分类算法研究[J].测绘学报, 2012, 41(4): 556–562.
  - [7] 吕启, 窦勇, 牛新, 等.基于 DBN 模型的遥感图像分类[J].计算机研究与发展, 2014, 51(9): 1911–1918.
  - [8] HU Y Y, FAN J C, WANG J, et al. Classification for PolSAR images based on adaptive nonlocal stacked sparse autoencoder[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(7): 1050–1054.
  - [9] LIN Z, JI K F, KANG M, et al. Deep convolutional highway unit network for SAR target classification with limited labeled training data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(7): 1091–1095.
  - [10] 王云艳, 何楚, 赵守能, 等.基于多层反卷积网络的 SAR 图像分类[J].武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(10): 1371–1376.
  - [11] GENG J, WANG H Y, FAN J C, et al. SAR image classification via deep recurrent encoding neural networks[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(4): 2255–2269.
  - [12] 翟育鹏.基于深度学习的极化 SAR 地物分类[D].西安: 西安电子科技大学, 2018.
  - [13] 焦李成.基于深度多示例学习的极化 SAR 图像分类方法: 中国, CN105894018B[P].2019-04-23.
  - [14] HUANG X Y, QIAO H, ZHANG B, et al. Supervised polarimetric SAR image classification using tensor local discriminant embedding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(6): 2966–2979.
  - [15] YANG S Y, WANG M, FENG Z X, et al. Deep sparse tensor filtering network for synthetic aperture radar images classification[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(8): 3919–3924.
  - [16] 关娇娇.小样本问题下的极化 SAR 图像地物分类[D].西安: 西安电子科技大学, 2020.

(收稿日期: 2021-09-02)

#### 作者简介:

杨鹤猛(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 智能无人系统、遥感图像处理技术。

孟秀军(1986-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: SAR 卫星数据智能分析技术。

陈艳芳(1987-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 卫星遥感、卫星导航。



扫码下载电子文档

- Conference on Advances in Computing.Jaipur , India : IEEE , 2016 : 256–260.
- [2] 齐航, 刘玮, 任治冰, 等.Sub 6GHz 频段无线传播特性研究[J]. 移动通信, 2019, 43(2): 19–24, 32.
- [3] GUTIERREZ A , RYAN W E .Performance of adaptive volterra equalizers on nonlinear satellite channels[C]//IEEE International Conference on Communications.Seattle , WA , USA : IEEE , 1995 : 488–492.
- [4] 赵知劲, 郑晓华, 沈雷. 一种基于格型滤波的二阶 Volterra 自适应均衡算法[J]. 电路与系统学报, 2010, 15(6): 11–15.
- [5] MOUSTAFA M , EL-RAMLY S .Channel estimation and equalization using backpropagation neural networks in OFDM systems[C]//2009 IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks , Cairo , Egypt : IEEE , 2009 : 1–4.
- [6] BURSE K , YADAV R N , SHRIVASTAVA S C .Channel equalization using neural networks : a review[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C Applications & Reviews, 2010 , 40(3): 352–357.
- [7] 蒋浩然. 基于神经网络的并行均衡技术研究与实现[D]. 成都 : 电子科技大学 , 2019.
- [8] MARMARELIS V Z , ZHAO X , et al .Volterra models and three – layer perceptrons [J]. IEEE Transactions on Neural Networks , 1997 , 8(6) : 1421–1433.
- [9] DASH S , DAS S R .Analysis of BER and MSE performance in nonlinear equalization using modified recurrent network[C]// IET Chennai Fourth International Conference on Sustainable Energy & Intelligent Systems.Chennai : IET , 2013 : 292–296.
- [10] LAVANIA S , KUMAM B , MATEY P S , et al .Adaptive channel equalization using recurrent neural network under SUI channel model[C]//2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems(ICIECS).Coimbatore , India : IEEE , 2015 : 1–6.
- [11] 张钟文.GFDM 通信系统信道估计技术的研究[D]. 大连 : 大连海事大学 , 2020.
- [12] PERMANA A K , HA MID E Y .DFT-based channel estimation for GFDM on multipath channels[C]//2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering(ICITEE).Bali , Indonesia : IEEE , 2018 : 31–35.
- [13] 孙婷婷. 莱斯信道下大规模 MIMO 自适应传输及用户调度[D]. 南京 : 东南大学 , 2019.
- [14] 左凤丽. 高速移动环境下 OFDM 系统关键技术研究[D]. 西安 : 西安电子科技大学 , 2014.
- [15] REID M B , SPIRKOVSKA L , OCHOA E .Rapid training of higher-order neural networks for invariant pattern recognition[C]//International 1989 Joint Conference on Neural Networks.Washington , DC , USA : IEEE , 1994 : 689–692.
- [16] KIM P .MATLAB deep learning : with machine learning , neural networks and artificial intelligence[M].Apress , 2017.
- [17] 朱亮亮. 高速移动无线信道建模与基于学习的自适应均衡[D]. 杭州 : 浙江大学 , 2019.
- [18] MORGAN D R , MA Z , KIM J , et al .A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Signal Processing , 2006 , 54(10) : 3852–3860.
- [19] 李戈. 60GHz 通信系统关键技术仿真[D]. 成都 : 电子科技大学 , 2013.

(收稿日期 : 2021-11-26)

**作者简介 :**

牛安东(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线通信。

苗硕(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线通信。

李英善(1972-), 通信作者, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 宽带无线通信、通信信号处理, E-mail : yingsl1122@nankai.edu.cn。



扫码下载电子文档

(上接第 94 页)

- [4] 高嵩, 胥剑涛. 基于 FPGA 的相控阵天线波束控制算法优化研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(3): 82–85, 95.
- [5] 李鹏, 席虹标, 陈国帅. 基于 PLL 技术低相噪时钟信号光纤传输系统[J]. 大众科技, 2020, 22(5): 8–10, 13.
- [6] 邹波. 一种针对数字阵列雷达的光传输系统设计与实现[D]. 成都 : 电子科技大学 , 2014.
- [7] 王天亮. 毫米波信号光纤传输关键技术的研究[D]. 北京 : 清华大学 , 2010.
- [8] 张安旭, 孙亨利, 戴一堂, 等. 光纤时频传输及其在航天探测中的应用[J]. 无线电工程, 2016, 46(9): 15–19.
- [9] 石雄. 时间和频率信号的光纤稳定传输技术研究[D]. 上

海 : 上海交通大学 , 2007.

- [10] 郑学杰, 陈俊宇, 兰才伦, 等. 基于高精度光纤长度测试建立的高效 DWDM 光纤配相方法[J]. 中国新通信 , 2021 , 32(2) : 63–64.
- [11] 吕菲, 韦文生, 雷敏, 等. 基于波分复用光纤传输的通信系统实验[J]. 实验室研究与探索 , 2016 , 35(3) : 41–45.
- [12] 余浩国. 波光纤分复用系统的实验及其性能研究[J]. 电子世界 , 2014(18) : 203.

(收稿日期 : 2022-05-18)

**作者简介 :**

陈凌(1975-), 通信作者, 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 航天测控系统, E-mail : 13568832652@163.com。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所