光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.020

微波光子链路中的附加相位噪声分析

瞿鹏飞*，肖永川，庾财斌，孙力军

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 针对模拟微波光子链路中附加相位噪声对微波信号相位噪声的恶化问题，详细研究了光链路中白噪声及有色噪声的产生机理，建立了光链路的附加相位噪声理论模型，阐述了附加相位噪声的变化规律，并通过实验证实了模型的正确性。同时针对本振信号的多路光分配典型应用，提出了 EDFA 辅助的附加相位噪声优化措施。实验结果表明所提出的相位噪声模型能够有效地应用于微波光子链路，能对附加相位噪声的分析和优化提供理论依据，具有较大的工程指导意义。

关键词： 微波光子学；光链路；相位噪声；附加相位噪声

中图分类号： TN015　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0555－05

Analysis of Addictive Phase Noise in Microwave-Photonic Links with External Modulation

QU Pengfei，XIAO Yongchuan，YU Caibin，SUN Lijun

（Chongqing Optoelectronics Research Institute，Chongqing 400060，CHN）

Abstract： For the degradation problem of microwave signal phase noise caused by the additional phase noise of analog microwave photonic link，the characteristics of the white noise and frequency noise of microwave photonic link (MPL) were fully analyzed. The addictive phase noise (APN) model of MPL was established to expound the APN behaviors，and the correctness of the model was also verified by experiments. As for the typical applications of local oscillator optical distribution system，the EDFA-assisted MPL can be used to improve the APN. Experimental results indicate that the proposed phase noise model can be effectively applied to the microwave photonic link and can provide theoretical basis for the analysis and optimization of additional phase noise.

Key words： microwave photonics；optical links；phase noise；addictive phase noise

0　引言

微波光子链路由于具有带宽大、损耗小、并行处理能力强以及抗电磁干扰等优点，在雷达、电子战中得到越来越广泛、深入的应用[1-4]。高性能模拟微波光子链路由于在射频光子前端、射频拉远、时钟传输等方面的强烈需求而获得了大量研究。宽带大动态的微波光子技术成为研究的热点，已有大量有关线性化、低噪声的微波光子互转换技术的报道[5-7]。然而高性能模拟微波光子链路的另一个重要特性，即链路的附加相位噪声一直未见详细研究。附加相位噪声表征了信号在微波光子互转换和传输过程中信号质量的恶化程度，这对于雷达本振信号的射频拉远、参考时钟的远距离传输等应用有着极其重大的意义。所以系统研究链路各个环节的重要参数与附加相位噪声之间的关系对于改善附加相位噪声，尤其是近 DC 端的相位噪声特性有极其现实的指导意义。本文详细分析了链路的噪声特性及相位噪声的转化模型，同时给出了器件关键参数和相位噪声的依赖关系，建立了较完整的本征微波光子链路相位噪声模型。该模型对于实际的链路设计、系统性能的综合优化具有一定的指导作用。

收稿日期：2020－03－12.

* **通信作者：**瞿鹏飞　　**E-mail：** etry24@163.com

1 微波光子链路的附加相位噪声模型

1.1 链路附加相位噪声理论模型

图 1 是一个典型的外调制本征微波光子链路，在该链路中，微波信号经发射机电光转换后，进入一定长度的光纤中传播，然后由接收机转换为电信号输出。在整个过程中，光链路自身元器件的各种噪声会转换到微波信号上，从而恶化信号的相位噪声。

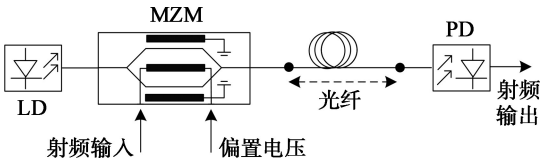


图 1 典型的外调制微波光子链路结构

按照信号相位噪声的定义，信号源的相位功率谱密度函数可表示为

$$L_0(f)=\frac{P^0_{\mathrm{SSB}}(f)}{P_0} \tag{1}$$

其中，P^0_{SSB} 指原始单边带噪声调制信号的功率谱，P_0 是信号功率；当该信号经过链路之后，P_{SSB} 会叠加链路的噪声，信号功率也会按照系统增益发生变化，新的 $L(f)$ 可以表达为

$$L_{\mathrm{new}}(f)=\frac{P'_{\mathrm{SSB}}(f)}{P_{\mathrm{out}}}=\frac{G_{\mathrm{RF}}P^0_{\mathrm{SSB}}(f)+N_{\mathrm{add}}(f)}{G_{\mathrm{RF}}P_0}=\frac{P^0_{\mathrm{SSB}}(f)}{P_0}+\frac{N_{\mathrm{add}}(f)}{G_{\mathrm{RF}}P_0} \tag{2}$$

式中，第一项为源信号的单边带相位功率谱密度，第二项为引入链路噪声之后的附加相位噪声。将链路噪声分为白噪声及有色噪声两类，则附加相位噪声可以表示为

$$L'(f)=\frac{N_{\mathrm{add}}(f)}{G_{\mathrm{RF}}P_0}=\frac{N_0kT}{P_0G_{\mathrm{RF}}kT}+\frac{N_f(f)}{P_0G_{\mathrm{RF}}}=\frac{NF\cdot kT}{P_0}+\frac{N_f(f)}{P_0G_{\mathrm{RF}}} \tag{3}$$

进一步从光链路噪声的角度来看，其主要来自于激光器和探测器中的白噪声以及闪烁噪声，白噪声包含热噪声、散粒噪声以及高频段的相对强度噪声。这类噪声将整体抬高输入微波信号远频端相位噪声的噪底，式(3)的第一项表明可以采用链路的噪声系数 NF 以及输入射频功率 P_0 等参量对相位噪声的噪底进行定量表征；闪烁噪声存在于激光器、探测器之中，研究表明激光器的 $1/f$ 噪声居主导地位，该噪声在近直流频端(Near-DC)表现出极强的频率依赖特性，它通过光链路中的激光器等有源器件的参量调制效应作用于微波信号相位噪声的近频端。式(3)中第二项的频率相关噪声对此进行了定量描述。

按照这种阐述，可以把微波光子链路等效为一个存在一定增益、噪声系数和 $1/f$ 噪声的放大器模型，该模型如图 2 所示。

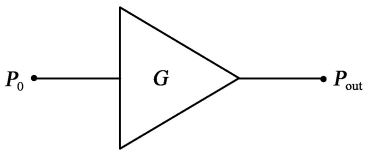


图 2 放大器相位噪声模型

通过上述相位噪声的产生机理分析，整个微波链路的附加相位噪声模型可从式(3)中进一步简化为

$$L'(f)=b_0+b_{-1}/f \tag{4}$$

式中，b_0 代表链路相位噪声的噪底水平，该值可表示为 $b_0=NF\cdot kT/P_0=1/CNR$；其中，CNR 为射频信号的载噪比，b_{-1} 是 $1/f$ 噪声模型的系数，该系数难以直接从理论上进行推导，通常可通过实验测量确定；b_0 与 b_{-1}/f 的交点称为拐角频率 f_c，其值表示为 $f_c=b_{-1}/b_0=b_{-1}CNR$。图 3 表示了附加相位噪声中两种噪声以及拐角频率之间的关系。总的来说，只要确定了式(1)中的两个系数，即可定量描述微波光子链路对微波信号相位噪声的影响。

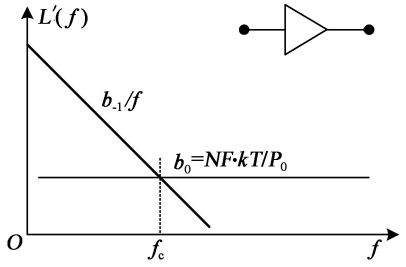


图 3 附加相位噪声中的白噪声与有色噪声

1.2 附加相位噪声噪底模型——b_0

结合式(3)和(4)，可以看出 b_0 可通过研究链路的宏观参数噪声系数加以确定。对于一个如图 1 所示的外调制光链路而言，系统的噪声系数可表达为[8]

$$NF_{\mathrm{RF}}(\phi_{\mathrm{dc}})=\frac{N_{\mathrm{out}}(\phi_{\mathrm{dc}})}{G_{\mathrm{RF}}(\phi_{\mathrm{dc}})kT} \tag{5}$$

其中增益和总输出噪声可表示为

$$G=\frac{1}{2}i_{\mathrm{B}}^2Z_{\mathrm{out}}K\sin^2\phi_{\mathrm{dc}} \tag{6}$$

$$N_{\mathrm{out}}(\phi_{\mathrm{dc}})=N_{\mathrm{Laser}}+N_{\mathrm{sn}}+N_{\mathrm{th}} \tag{7}$$

在式(5)～(7)中，i_B 表示光电探测器接收到的直流光电流，$i_B=0.5\mathscr{R}t_m t_{md}P_{m,in}$，$\mathscr{R}$ 是光电探测器的响应度，t_m 是调制器的损耗，$P_{m,in}$ 是调制器的输入光功率，t_{md} 是调制器到光电探测器的损耗，Z_{out} 是输出端负载，ϕ_{dc} 是调制器的偏置点，$K=2\pi^2 Z_{in}/V_\pi^2$ 是电光调制器的电光调制响应，Z_{in} 是电光调制器的输入阻抗，V_π 是电光调制器的半波电压，N_{Laser}，N_{sn}，N_{th} 分别是激光器的相对强度噪声、散弹噪声和热噪声，它们可分别表示为

$$N_{Laser}=\frac{\langle i_B\rangle^2}{2}10^{\frac{RIN}{10}}\Delta f(1-\cos\phi_{dc})^2 Z_{out} \tag{8}$$

$$N_{sn}=2e\langle i_B\rangle\Delta f(1-\cos\phi_{dc})Z_{out} \tag{9}$$

$$N_{th}=[G_{RF}(\phi_{dc})+1]\Delta fkT \tag{10}$$

根据上述模型就可以定量获得相位噪声噪底，同时还能看出相位噪声噪底 b_0 与链路的输出噪底 N_{out} 具有密切的联系，它们之间的相互关系可由式(11)表示。该公式表明两者的噪底在数值上并不相等，而是与光子链路的输入射频功率和链路增益相关。

$$\frac{N_{out}}{b_0}=P_0 G_{RF} \tag{11}$$

1.3　$1/f$ 相位噪声模型——b_{-1}

$1/f$ 噪声是自然界中近直流频端中普遍存在的一种现象，这种噪声的功率谱密度与频率成反比。在微波光子链路中，DFB 激光器的相对强度噪声(RIN)在近直流频端具有较强的 $1/f$ 噪声特性。而且 RIN 噪声将通过链路中的非线性效应在探测器中转换为微波信号的相位噪声，其转换关系可表示为[9]

$$L'(f)=RIN(f)\cdot P_{opt}^2\cdot\left(\frac{d\varphi}{dP_{opt}}\right)^2 \tag{12}$$

其中，$L'(f)$为偏离微波载波频率 f 处的相位噪声谱密度，$d\varphi/dP_{opt}$ 为微波相位-光功率转换斜率。由于 $RIN(f)$在近直流端可近似为

$$RIN(f)=\frac{RIN(1\text{ Hz})}{f} \tag{13}$$

将式(12)代入式(11)中，并结合式(4)的第二项，即 $1/f$ 噪声项，可以很容易地观察到其系数可以用式(14)表示：

$$b_{-1}=RIN(1\text{ Hz})\cdot P_{opt}^2\cdot\left(\frac{d\varphi}{dP_{opt}}\right)^2 \tag{14}$$

式中，$\frac{d\varphi}{dP_{opt}}$ 是探测器中的微波相位-光功率转换斜率，$RIN(1\text{ Hz})$以及转换斜率在工程中一般通过实际测量获得。一般而言，较好的 DFB 激光器其 $RIN@1$ Hz 可达到 -80～-100 dB/Hz，线性斜率转换效率处于 10 ～ 50 rad/W，b^{-1} 处于 -100 dB/Hz 的水平。文献[10]对此有较好的论述，本文不再赘述。

2　附加相位噪声分析及优化

2.1　链路附加相位噪声分析

为了从链路性能的角度阐述链路参数与附加相位噪声之间的关系，采用表 1 所示的典型链路参数进行较详细的分析。

表 1　用于仿真分析的各种参数

参数	数值
激光功率 $P_{m,in}$/dBm	16
相对强度噪声 RIN/(dB·Hz^{-1})	-160
调制器插损 t_m/dB	5
调制器半波电压 V_π/V	5
链路光插损 t_{md}/dB	可变
探测器响应度 $\mathscr{R}$/(A·W^{-1})	0.8
射频频率 f/GHz	10
输入射频功率 P_0/dBm	10
输入阻抗 R_{in}/Ω	50
输出阻抗 R_{out}/Ω	50
传输光纤长度 L/km	1

从图 4 的曲线中可以看出，相位噪声的远端噪底取决于链路的噪声系数以及输入信号功率水平。链路的噪声系数受到链路中激光光功率、调制器偏置点、链路光损耗以及探测器响应度等诸多因素影响。为了尽可能地取得较低的相位噪声噪底，必须优化链路，实现较低的噪声系数；输入射频功率受到调制器 1 dB 压缩点的限制。但通过优化数以及允许 15 dBm 的输入功率，相位噪声噪底达到 -160 dBc/Hz 是可能的，这已经远优于大多数射频信号的远端噪底了，故几乎不会恶化信号的远端相位噪声。

结合 $1/f$ 噪声模型以及表 1 中所示的典型参数，对微波光子链路进行了附加相位噪声分析，并结合实测相位噪声数据进行了对比分析，可以从图 5 中看出光链路的附加相位噪声在近 DC 端呈现出 $1/f$ 特性，并与 $1/f$ 相位噪声模型吻合良好。实际上提取 1 kHz 处的 RIN 值是该模型的关键，这可以从实验数据或者激光器供应商的数据手册中获得；另外远端噪底也能通过其模型获得很好的验证。对于本例所用的链路而言，可计算出其噪声系数约为

35 dB，在输入射频功率 10 dBm 下，其噪底约为 $b_0 = NF \cdot kT/P_{in} = -149$ dBc/Hz，这与实验数据也具有较好的一致性。总的来说，远端噪底由于只涉及链路的宏观参量，无论从实验还是理论上都比近端 $1/f$ 相位噪声的相关参量要准确且易于获取，同时更易于改善。

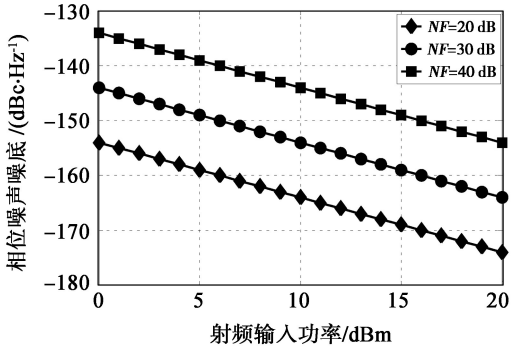


图 4 输入射频功率与相位噪声噪底的关系

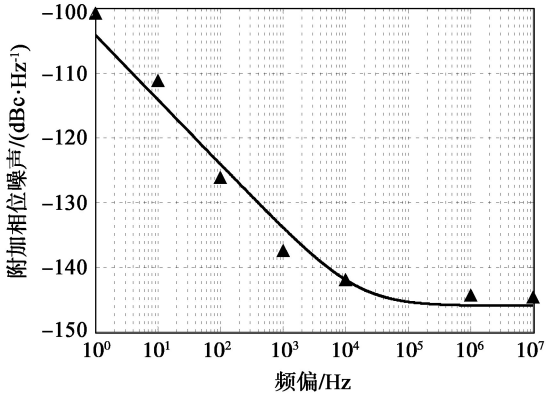


图 5 链路附加相位噪声的理论和实测对比

2.2 本振信号射频光分配的相位噪声特性

低附加相位噪声的微波光子链路最重要的应用就是雷达、电子战等领域中的本振传输。随着射频拉远及大规模天线阵的迫切需求，实现低附加相位噪声下本振信号的多路网络分配成为一个亟待解决的问题。本振分配带来的显著问题是光信号功率损失导致的射频相位噪声恶化。图 6 显示出在不同分配路数下，单路信号的噪声系数发生较大的恶化。在这种情况下射频信号的载噪比剧烈恶化，所以其相位噪底随着分配路数的增多不断抬高，信号的相位噪声随之恶化，见图 7 所示的相位噪声曲线。

克服因分路引起的噪声系数及相位噪声恶化的方法通常是在发射机之后采用光放大器进行补偿。图 6 显示了采用光放大器之后的链路的噪声系数改善，从图中可以看到，不同的放大增益下，噪声系数得到了极大的改善，但由于放大器也存在一定的噪声系数，所以即使完全补偿光分路带来的光功率损失，也不可能实现完全的噪声系数补偿，这与单路信号的噪声系数仍相差 5 dB 左右。同时从附加相位噪声的角度来看，单纯的本振分配必然导致信号的相位噪声恶化，但通过放大补偿能够极大地改善相位噪声，以满足应用的需求，但同样因为放大器噪声的存在，导致无法达到单路时的相位噪声水平。

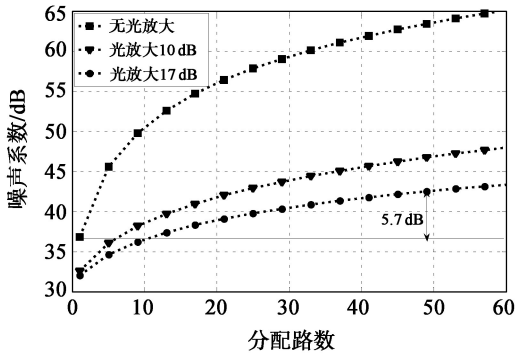


图 6 不同分配路数下的噪声系数变化

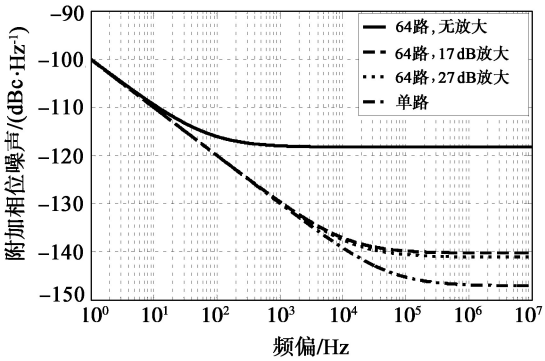


图 7 不同分配路数下信号的相位噪声变化

总的来说，通过引入低噪声、增益合适的光放大器，能够实现本振分配的附加相位噪声改善，可以达到较好的水平，这对于大多数高频应用（比如 GHz 量级的本振信号），几乎可以做到不恶化其相位噪声。而对于相位噪声性能本身很好的低频信号（兆赫兹量级），则需要采取更低 RIN、高功率、窄线宽激光光源来保证链路的低附加相位噪声。

3 结论

针对模拟微波光子链路在本振光传输、分配时因附加相位噪声恶化的问题，本文详细研究了光子链路附加相位噪声的产生机理，并建立了相应的理论模型，从白噪声及频率相关噪声的角度阐述了附加相位噪声的变化规律。同时从实验和理论两方面对附加相位噪声进行了分析；针对雷达或电子战等领域中的射频拉远、本振分配等应用场景，提出了采

用光放大补偿的措施来优化附加相位噪声，并明确了放大器的选用原则。结果表明本文的相位噪声模型能够有效应用于微波光子链路，能对附加相位噪声的分析和优化提供理论依据，具有较好的工程指导意义。

参考文献：

[1] Jose C, Dalma N. Microwave photonics combines two worlds [J]. Nature Photonics, 2007, 1: 319-330.

[2] Vilcot A, Cabon B, Chazelas J. Microwave Photonics——From Components to Applications and Systems[M]. Kluwer: Kluwer Academic Publishers, 2003: 306-375.

[3] Seed A J, Williams K J. Microwave photonics [J]. J. Lightwave Technol., 2006, 24(12): 4628-4641.

[4] Williamson R C, Esman R D. RF photonics[J]. J. Lightwave Technol., 2008, 26(9): 1145-1153.

[5] Wang Renyuan, Bhardwaj A, Li Yifei. Efficent RF frequency down conversion using coupling quantum-well optical phase modulator[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2011, 23(10): 645-647.

[6] Marpaung D, Roeloffzen C, Etten W V. Enhanced dynamic range in a directly modulated analog photonic link[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2009, 21(24): 1810-1812.

[7] Cox C H, Ackerman E I, Betts G E, et al. Limits on the performance of RF-over-fiber links and their impact on device design[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2006, 54(2): 906-920.

[8] Urick V J, Bucholtz F, Mckinney J D, et al. Long-haul analog photonics[J]. J. of Lightwave Technol., 2011, 29(8): 1182-1205.

[9] Bibey M B, Deborgies F. Very low phase-noise optical links—experiments and theory [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(12): 2257-2262.

[10] Eliyahu D, Seidel D, Maleki L. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an opto-electronic oscillator [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(2): 449-456.

作者简介：

瞿鹏飞(1983—)，男，博士，工程师，研究方向为微波光子学。

(上接第 554 页)

[2] Krombach N, Droeschel D, Houben S, et al. Feature-based visual odometry prior for real-time semi-dense stereo SLAM [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 109: 38-58.

[3] Schops T, Sattler T, Pollefeys M. BAD SLAM: Bundle adjusted direct RGB-D SLAM[C]// Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 134-144.

[4] Klein G, Murray D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces[C]// Proc. of the 2007 6th IEEE and ACM Inter. Symp. on Mixed and Augmented Reality IEEE Computer Society, 2007: 1-10.

[5] Eudes A, Lhuillier M, Naudet-Collette S, et al. Fast odometry integration in local bundle adjustment-based visual slam [C]// IEEE 2010 20th Inter. Conf. on Pattern Recognition, 2010: 290-293.

[6] Mur-Artal R, Montiel J M M, Tardos J D. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system [J]. IEEE Trans. on Robotics, 2015, 31(5): 1147-1163.

[7] Mur-Artal R, Tardos J D. ORB-SLAM2: An open-source slam system for monocular, stereo and RGB-D cameras[J]. IEEE Trans. on Robotics, 2017, 33(5): 1255-1262.

[8] Engel J, Schops T, Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM[C]// European Conf. on Computer Vision. Springer, Cham, 2014: 834-849.

[9] Engel J, Koltun V, Cremers D. Direct sparse odometry[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 40(3): 611-625.

[10] Karami E, Prasad S, Shehata M. Image matching using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: performance comparison for distorted images[C]// IEEE Newfoundland Electrical and Computer Engin. Conf., 2015.

[11] Hornung A, Wurm K M, Bennewitz M, et al. OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees [J]. Autonomous Robots, 2013, 34(3): 189-206.

[12] Mo H, Wang K, Wang H, et al. Research on loop closing for SLAM based on RGB-D images [C]// Proc. of 2018 Chinese Intelligent Systems Conf., 2019: 739-748.

[13] Forster C, Pizzoli M, Scaramuzza D. SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry[C]//2014 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2014: 15-22.

[14] Shi B, Matsushita Y. Self-calibrating photometric stereo [C]// 2010 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 1118-1125.

[15] Grisetti G, Kummerle R, Strasdat H, et al. g2o: A general framework for (hyper) graph optimization[C]//Proc. 2011 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, 2011.

[16] Sturm J, Engelhard N, Endres F, et al. A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems[C]//Proc. 2012 IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2012: 573-580.

[17] Kerl C, Sturm J, Cremers D. Dense visual SLAM for RGB-D cameras [C]// Proc. 2013 IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2013: 2100-2106.

作者简介：

胡章芳(1969—)，女，重庆市人，教授，硕士生导师，主要研究领域为数字图像处理、微机电系统、智能信号处理。