

文章编号: 2095-4980(2024)06-0658-07

用于太赫兹通信的双向全并行相位估计算法

王颖^{a,b}, 刘娟^{a,b}, 刘金鑫^{a,b}, 林长星^{a,b}, 邓贤进^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200; b.电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 在太赫兹通信的超宽带应用场景下, 太赫兹载波是通过多次倍频实现, 因而导致相噪严重恶化。基于太赫兹频率下的多极/零相位噪声模型, 在传统的盲相位估计算法的基础上, 提出了一种全并行化的相位估计算法。该算法通过在每个并行数据中插入导频, 将导频相噪信息作为初始相位对并行数据进行相位扩展及旋转鉴相。借鉴传统盲相位估计算法的最佳相位估计值的判决选择思路, 同时利用前一时刻导频和当前时刻导频, 对当前并行数据从前后两个方向进行相位估计并对前后两个估计相位基于距离前后导频的位置进行加权求和以获得最佳相位估计信息。经过仿真验证, 通过该算法后残余相噪在 1 MHz 和 10 MHz 处分别降低 10 dBc/Hz 和 25 dBc/Hz。

关键词: 并行化; 相位估计算法; 太赫兹通信; 信号处理

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024104

Bidirectional fully parallel phase estimation algorithm for terahertz communication

WANG Ying^{a,b}, LIU Juan^{a,b}, LIU Jinxin^{a,b}, LIN Changxing^{a,b}, DENG Xianjin^{a,b}

(a.Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610200, China; b.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: There exists severe deterioration of phase noise in the ultra wideband application scenario of terahertz communication, since terahertz carriers are achieved through multiple frequency doubling. Based on the multipole/zero phase noise model at terahertz frequency, a fully parallelized phase estimation algorithm is proposed on the basis of traditional blind phase estimation algorithms. This algorithm inserts pilots into each parallel data and uses pilot phase noise information as the initial phase to perform phase extension and rotation phase detection on the parallel data. Referring to the traditional blind phase estimation algorithm, the decision selection approach for the optimal phase estimation value is adopted. At the same time, the previous and current time pilots are employed to estimate the phase of the current parallel data from the front and back directions. The two estimated phases are weighted and summed based on the distance between the front and back pilots to obtain the optimal phase estimation information. After simulation verification, the residual phase noise is reduced by 10 dBc/Hz and 25 dBc/Hz at 1 MHz and 10 MHz, respectively, through this algorithm.

Keywords: parallelization; phase estimation algorithm; terahertz communication; signal processing

超高速无线通信的应用已经十分广泛, 随着毫米波频段被大量占用, IEEE 已经将 253~322 GHz 的 69 GHz 的带宽作为太赫兹通信的一个频段^[1]。产生太赫兹频段的信号一般通过两种方式: 基于电子学和基于光子学的方式。基于电子学的方式是通过较低频率的晶振通过多次上变频来产生太赫兹频段的信号; 基于光子学的方式则是用两个自由运行的激光器通过光学外差的方式来产生太赫兹信号^[2]。无论是电子学由低频向上变频还是光子学由高频向下变频的方式, 相位噪声和大的载波频率偏移都是影响通信性能的主要因素, 太赫兹频段的本振需要进行多次倍频或混频, 载波的相位噪声会更大, 因此研究应用于太赫兹频段的相噪估计算法十分必要。基于决策导向反馈的相位估计算法是一种常用的算法^[3], 但是太赫兹通信由于传输速率极高而目前的硬件时钟速率有

限, 需要进行大量的并行化处理, 导致反馈延迟随着并行度成倍增加。Viterbi-Viterbi(VV)算法^[4]是一种非数据辅助的估计算法, 通过对 M 阶的正交幅度调制(M -Quadrature Amplitude Modulation, M -QAM)信号进行 M 次方来消除调制模式带来的相位影响, 然后通过连续 N 个符号块来逐块平均以减轻加性噪声带来的相位估计误差。盲相位搜索(Blind Phase Search, BPS)算法^[5]是一种前馈搜索算法, 但是所需要的测试相位角数量会随着调制点的增加而增加, 进而导致计算复杂度大大增加。

本文提出了双向全并行相位估计算法的具体实现方案, 在构造的太赫兹相噪模型下进行了仿真验证, 将仿真结果与传统的 BPS 算法行了对比。

1 相位噪声模型

非理想振荡器输出的不完全周期性引入了相位噪声, 经典的相位噪声模型是维纳相位噪声模型^[6], 其根据单边带相位噪声的洛伦兹部分产生, 具有 $1/f^2$ 的形状。但是随后学者发现维纳相噪只表征了热噪声的无序运动, 在实际测试中的相噪功率谱只在中间部分保持 $1/f^2$ 的形状, 在近载波部分由于闪烁噪声的影响, 呈现 $1/f^3$ 的形状^[3], 如图 1 所示。图中 $\Delta\omega$ 为偏离载波频率的频差。

整体相位噪声可以表示为^[7]:

$$\phi(t) = \phi_{\text{white}}(t) + \phi_{\text{flicker}}(t) \quad (1)$$

式中: $\phi_{\text{white}}(t)$ 表示热噪声引起的相位噪声; $\phi_{\text{flicker}}(t)$ 表示闪烁噪声引起的相位噪声。

目前常用的振荡器有的基于 CMOS, 有的基于 GaAs、SiGe 和 GaN 材料。基于 GaAs 或 SiGe 的振荡器相噪水平较低^[8], 但是价格昂贵且功率较高, 基于 CMOS 的振荡器相噪水平差一些^[9-11], 但胜在价格便宜且功耗低, 因此在实际民用无线通信中, 通常用户端采用基于 CMOS 的振荡器, 基站端采用基于 GaAs 的振荡器^[12]。文献[13]中, 基于 0.13 μm SiGe-BiCMOS 工艺设计了一款太赫兹频段的 320 GHz 振荡器, 实测载波频率为 311.55 GHz 时的相噪水平为 $-90 \text{ dBc/Hz}@1\text{MHz}$ 。

各大通信公司也针对相噪损伤提出自己的模型, IEEE P802.15^[14]中相噪模型采用单极/零模型, 其功率谱密度可表示为式(2), 该模型不考虑其他相位噪声源, 只是锁相环(Phase Locked Loop, PLL)的简单线性模型。

$$S(f) = D_{\text{ps}}(0) \frac{\left[1 + (ff_z)^2\right]}{\left[1 + (ff_p)^2\right]} \quad (2)$$

式中: $D_{\text{ps}}(0)$ 是零频率处的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD); f_z 是零点频率; f_p 是极点频率。

随着通信频率的不断提升, 相噪问题更加严重, 无法再用简单的单极/零模型表征。三星公司在 3GPP 的会议上对单极/零模型进行扩展^[15], 发展为多极/零模型。并给出了 30 GHz 和 60 GHz 的实际振荡器的模型参数, 多极/零模型的公式如式(3)所示。

$$S(f) = D_{\text{ps}}(0) \prod_{n=1}^N \frac{1 + (ff_{z,n})^2}{1 + (ff_{p,n})^2} \quad (3)$$

同时, 诺基亚公司也在 3GPP 会议上提出另一种模型^[16], 由于通信系统中的振荡器通常需要采用 PLL 进行锁定, 基于 PLL 的振荡器的总 PSD 受到了振荡电路上不同组件的影响, 参考时钟和 PLL 组件主要影响 PLL 环路带宽内的 PSD, 而压控振荡器(Voltage-Controlled Oscillator, VCO)的品质则会影响环路带宽外的相噪 PSD, 因此诺基亚公司提出的模型综合考虑参考时钟、PLL 和 VCO 的影响(如图 4 所示)。其 PSD 如式(4)所示。

$$S_{\text{Ref/PLL/VCO}_2/\text{VCO}_3}(f) = D_{\text{ps}}(0) \left[\frac{1 + (ff_z)^k}{1 + f^k} \right] (\text{dB}) \quad (4)$$

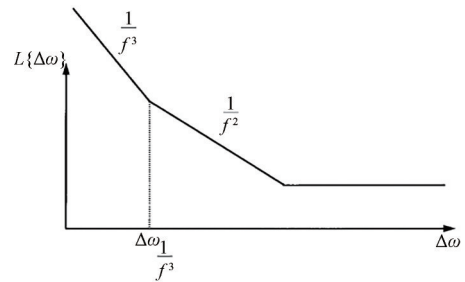


Fig.1 Lyapunov coefficient of the improved Logistic map
图 1 相位噪声模型图

其中

$$S_{\text{Total}}(f) = \begin{cases} S_{\text{Ref}}(f) + S_{\text{PLL}}(f), & \text{when } f \leq \text{loop BW} \\ S_{\text{VCO}_2}(f) + S_{\text{VCO}_3}(f) & \text{when } f > \text{loop BW} \end{cases} \quad (5)$$

$$D_{\text{PS}}(0) = \text{FOM} + 20\log f_c - 10\log\left(\frac{P}{\text{1mW}}\right) \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

式中 f_c 为载波频率。

美国空军研究实验室 (Air Force Research Laboratory, AFRL) 的 C T Parisi 参考多极/零模型, 基于实际的太赫兹硬件平台分别对 130 GHz、220 GHz 和 1.02 THz 下的相位噪声进行了测试并基于多极/零模型进行了建模^[17]。表 1 是对毫米波频段和太赫兹频段的相噪对比。

表 1 基于多极/零模型的不同频段的相噪模型参数

Table 1 Phase noise model parameters for different frequency bands based on multipole/zero model

carrier frequency ($f_{c,\text{base}}$)	30 GHz ^[15]	60 GHz ^[15]	130 GHz ^[17]	225 GHz ^[17]	1.02 THz ^[17]
power spectral density at zero frequency/(dBc/Hz)	-79.4	-70.0	-66.5	-60.0	-48.0
pole point/MHz	[0.1, 0.2, 8.0]	[0.005, 0.4, 0.6]	[0.01, 6, 10]	[0.03, 0.85, 8]	[0.06, 1, 5]
zero point/MHz	[1.8, 2.2, 40]	[0.02, 6, 10]	[0.005, 0.03, 5]	[0.005, 0.05, 0.8]	[0.003, 0.4, 0.15]

2 双向全并行相噪估计算法

BPS 算法如图 3 所示, 对输入的 M -QAM 信号进行了 M 个相位的预旋转, 并对每个旋转后的信号进行硬判决并计算判决前后的相位差, 如式(7)所示, 通过计算并行度下所有的相位差之和, 并选出 M 个相位差和的最小值作为估计的相位噪声来进行补偿, 这种前馈算法由于没有反馈环路, 不存在并行化会劣化性能的情况。

$$|d_{k,b}|^2 = \left| Y_k \exp\{j\varphi_b\} - [Y_k \exp\{j\varphi_b\}]_D \right|^2 \quad (7)$$

式中: $d_{k,b}$ 为经过预旋转的输入信号和将经过预旋转的输入信号进行硬判决的信号的欧氏距离; φ_b 为预旋转的相位; Y_k 为该算法的输入信号。

BPS 算法在小相噪模型下性能较好,

但在大相噪场景下, 信号已经旋转到距离其他标准星座点更近的位置, 采用 BPS 算法就会出现相噪估计通道选择错误而出现残余相噪毛刺的情况。本文在 BPS 算法的基础上进行了优化, 通过对数据进行帧结构设计, 将每个并行时刻最后一个符号设计为导频, 帧结构如图 4 所示。

在并行相位估计时利用上一个时刻和当前时刻的导频计算出接收导频和原本导频值的相位差, 作为初始相位通过相位扩展和旋转, 采用 BPS 算法的形式从前后两个方向进行最佳相位选择, 本算法的优点是相位扩展基于并行数据导频的估计相位进行扩展, 增加了估计的准确性, 且不会因为调制模式的增加而增加扩展分支。同时每次计算都只利用了上一个导频、当前导频和数据信息, 不涉及后续数据

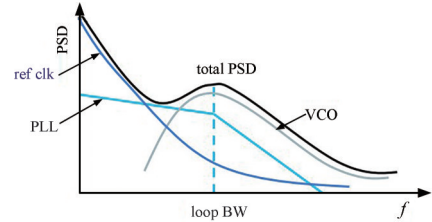


Fig.2 Schematic diagram of phase noise model considering reference clock, PLL, and VCO comprehensively^[16]
图 2 综合考虑参考时钟、PLL 和 VCO 的相噪模型示意图^[16]

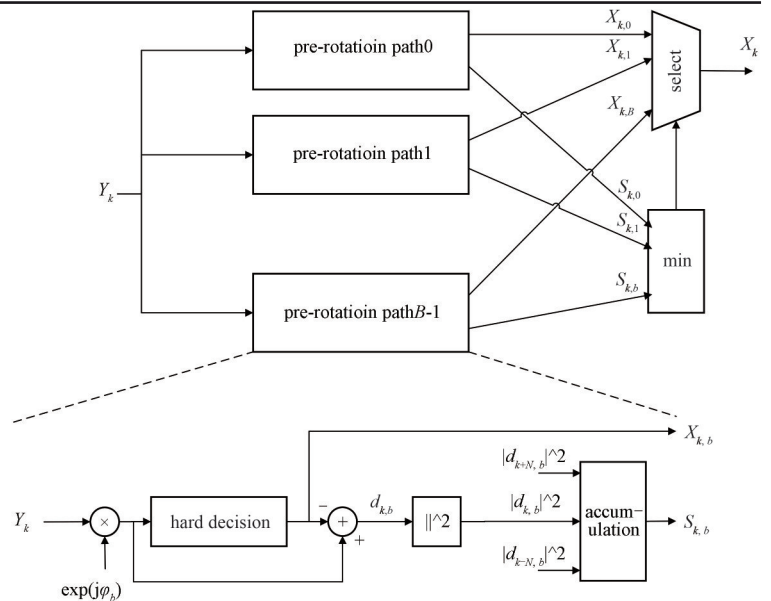


Fig.3 Implementation of BPS
图 3 盲相位搜索算法实现示意图

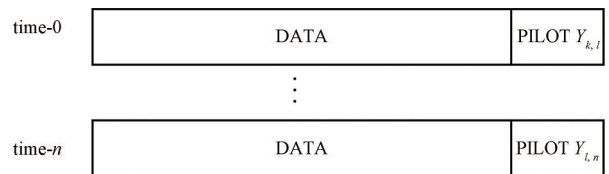


Fig.4 Frame structure of bidirectional parallel phase estimation algorithm
图 4 双向全并行相位估计算法帧结构

的反馈信息，虽然增加了群延时，但是由于没有反馈环路，并不会如传统反馈算法那样随着并行度的增加性能劣化，其计算示意图如图 5 所示。

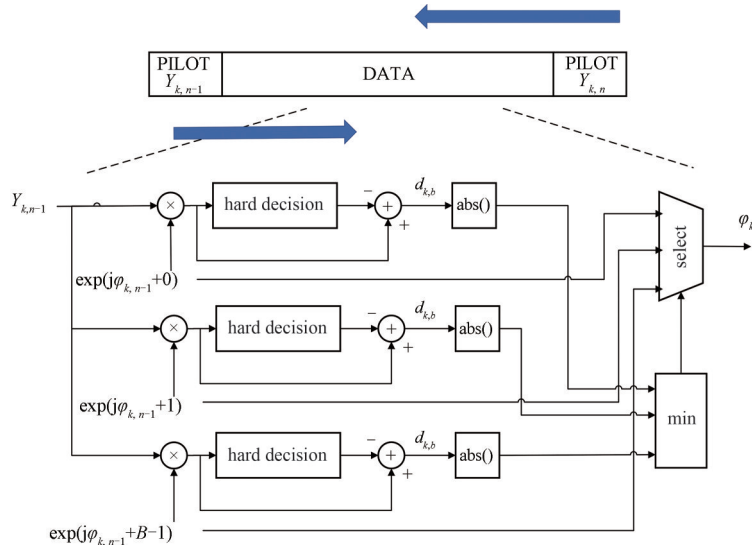


Fig.5 Implementation scheme of bidirectional parallel phase estimation algorithm
图 5 双向全并行相位估计算法实现方案

3 仿真结果分析

在实际的载波恢复和相噪估计算法中，可以将传统的判决反馈载波估计算法和前馈相位估计算法进行串行提高相噪估计性能，图 6 是所提出的并行相噪估计算法的仿真架构。

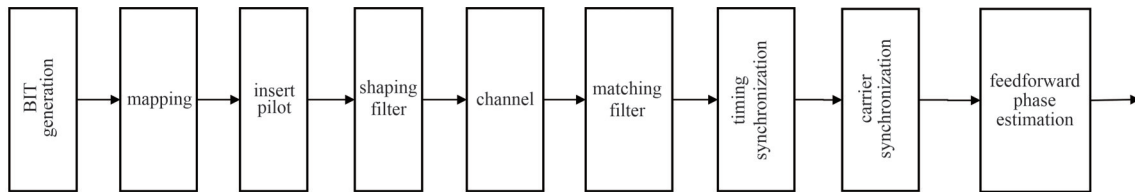


Fig.6 Simulation architecture of bidirectional parallel phase estimation algorithm
图 6 双向全并行相位估计算法(Forward Backward Matrix,FBM)仿真架构

仿真基于 187.5 M 的并行符号速率，并行度采用 20 并行，调制模式为 16QAM，可以实现 15 Gbps 的传输速率。根据文献[13]中在 311.6 GHz 时的实际相噪结果，相噪参数设置如表 2 所示，同时相噪采用图 7 所示的方式生成，由该方法产生相噪的功率谱密度如图 8 所示，为了更好地展示相噪的影响，将信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)设置为 25 dB。

表 2 仿真相噪模型参数

Table2 Simulation phase noise model parameters

frequency deviation/(@ Hz)	phase noise/dBc
100 kHz	-62.78
1 MHz	-90.09
30 MHz	-100.75

图 9(a)是将原始的 BPS 算法进行并行化处理的前后残余相噪对比图，从图 10(a)可以看到由表 2 的参数产生的相噪较大，已经超出了 16QAM 信号的可正确硬判决区间，因此图 9(a)通过 BPS 算法仿真的残余相噪会出现较多毛刺。图 9(b)是优化后的并行相噪估计算法(FBM)的前后残余相噪对比图，可以看到优化后的算法残余相噪更小，最大残余相噪减少了 50%左右，图 10 是经过该算法前后的星座图，图 11 则是经过相噪补偿算法前后的功率谱对比图。

4 结论

本文提出了一种用于太赫兹通信中的并行相噪估计算法，在传统盲相位估计算法的基础上，通过在并行数据流中插入导频并从前后两个方向利用旋转数据判决相位信息进行估计。基于文献[13]实测的太赫兹相噪模型通过仿真证明并行化处理中的双向相位估计算法估计性能优于 BPS 算法，并从残余相噪的时域和频域对比和星座图等多个维度对算法的性能进行了仿真验证，时域对比残余相噪最大值降低了 50%，功率谱对比残余相噪在

1 MHz 处降低 10 dBc/Hz 和在 10 MHz 处降低 25 dBc/Hz。

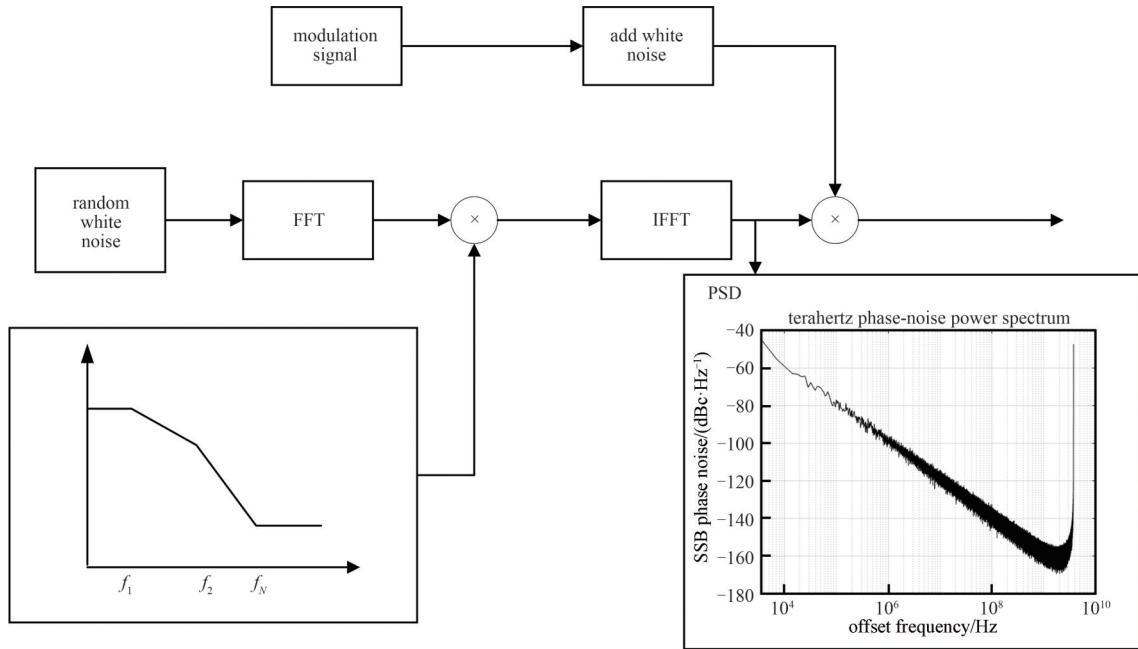


Fig.7 A terahertz phase noise model
图 7 构建的太赫兹相噪模型示意图

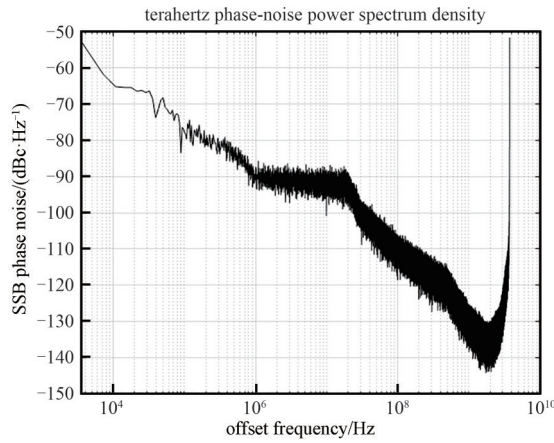


Fig.8 Power spectral density of terahertz phase noise model constructed based on literature [13]
图 8 基于文献[13]构建的太赫兹相噪模型功率谱密度

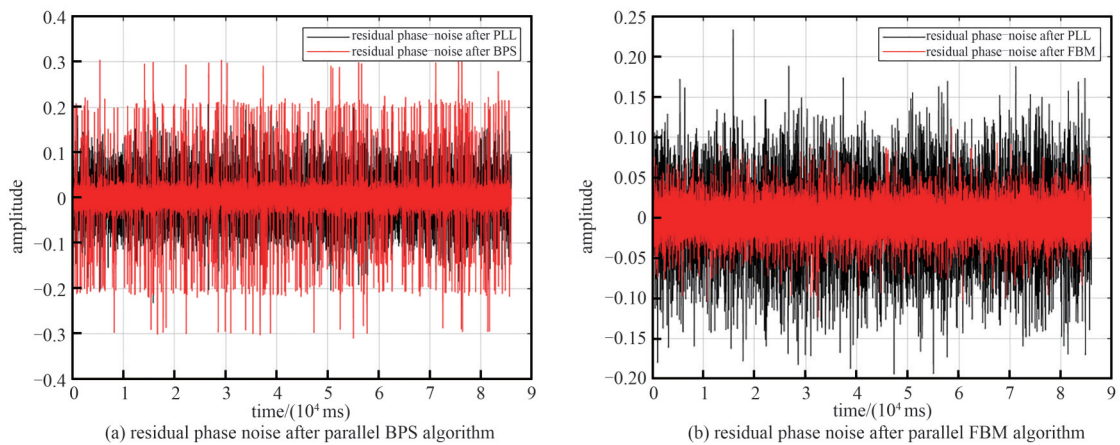


Fig.9 Comparison of residual phase noise
图 9 残余相噪对比图

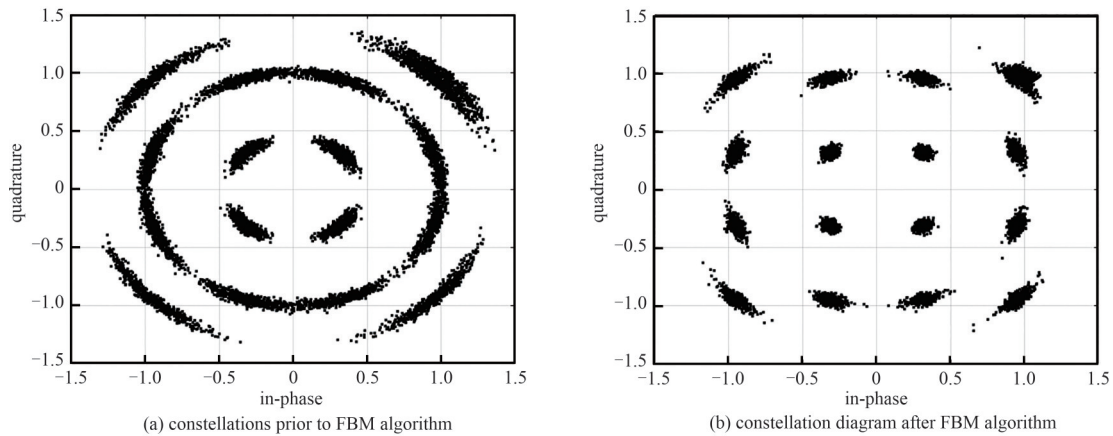


Fig.10 Constellation diagrams of bidirectional fully parallelized phase estimation algorithm

图10 双向全并行相位估计算法前后星座图

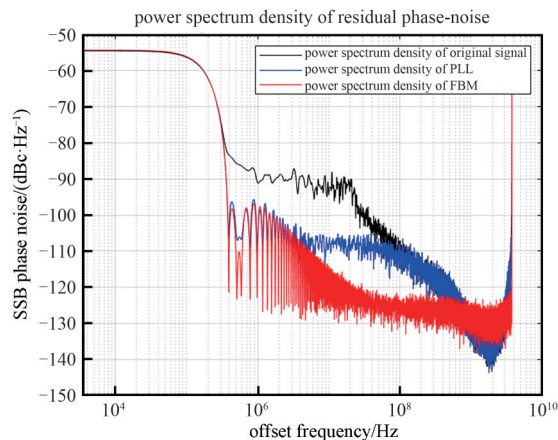


Fig.11 Comparison of residual phase noise power spectra of bidirectional fully parallelized phase estimation algorithm

图11 双向全并行相位估计算法残余相噪功率谱对比图

参考文献：

- [1] PETROV V, KURNER T, HOSAKO I. IEEE 802.15.3d: first standardization efforts for sub-terahertz band communications toward 6G[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(11): 28–33. doi:10.1109/MCOM.001.2000273.
- [2] MOON S. 6G indoor network enabled by photonics- and electronics-based sub-THz technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(2): 499–510. doi:10.1109/JLT.2021.3113898.
- [3] IP E, KAHN J M. Feedforward carrier recovery for coherent optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(9): 2675–2692. doi:10.1109/JLT.2007.902118.
- [4] VITERBI A J, VITERBI A M. Nonlinear estimation of PSK-modulated carrier phase with application to burst digital transmission [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(4): 543–551. doi:10.1109/TIT.1983.1056713.
- [5] PFAU T, Hoffmann S, NOÉ R. Hardware-efficient coherent digital receiver concept with feedforward carrier recovery for M -QAM constellations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(8): 989–999. doi:10.1109/JLT.2008.2010511.
- [6] LEESON D B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(2): 329–330. doi:10.1109/PROC.1966.4682.
- [7] KHANZADI M R, MEHRPOUYAN H, ALPMAN E, et al. On models, bounds, and estimation algorithms for time-varying phase noise[C]// 2011 5th International Conference on Signal Processing and Communication Systems(ICSPCS). Honolulu: IEEE, 2011: 1–8. doi:10.1109/ICSPCS.2011.6140897.
- [8] NAKAMURA T, MASUDA T, WASHIO K, et al. A push-push VCO with 13.9-GHz wide tuning range using loop-ground transmission line for full-band 60-GHz transceiver[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2012, 47(6): 1267–1277. doi:10.1109/JSSC.2012.2187470.
- [9] FEI Wei, YU Hao, FU Haipeng, et al. Design and analysis of wide frequency-tuning-range CMOS 60 GHz VCO by switching

- inductor loaded transformer[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I—Regular Papers, 2014, 61(3): 699–711. doi:10.1109/TCSI.2013.2284000.
- [10] CHIANG Y C, CHANG Y H. A 60 GHz CMOS VCO using a fourth-order resonator[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(9):609–611. doi:10.1109/LMWC.2015.2451356.
- [11] XI Tianzuo, GUO Shita, GUI Ping, et al. Low-phase-noise 54 GHz quadrature VCO and 76 GHz/90 GHz VCOs in 65 nm CMOS process[C]// 2014 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium(RFIC). Tampa, FL, USA: IEEE, 2014: 257–260. doi:10.1109/RFIC.2014.6851713.
- [12] Huawei, HiSilicon. Phase noise model for above 6 GHz[Z]. 3GPP, 2016.
- [13] LIANG Yuan, BOON C C, DONG Yangtao, et al. A 311.6 GHz phase-locked loop in 0.13 μm SiGe BiCMOS process with 90 dBc/Hz in-band phase noise[C]// 2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium(IMS). Los Angeles: IEEE, 2020: 1133–1136. doi:10.1109/IMS30576.2020.9224047.
- [14] Working Group for Wireless Personal Area Networks(WPANs). RF impairment models for 60 GHz-band SYS/PHY simulation [R/OL]. [2024-02-09]. <https://mentor.ieee.org/802.15/file/06/15-06-0477-01-003c-rf-impairment-models-60ghz-band-simulation.pdf>.
- [15] Samsung. Discussion on phase noise modeling[Z]. 3GPP, 2016.
- [16] Nokia. Alcatel-lucent Shanghai bell, on the evaluation of PN model[Z]. 3GPP, 2016.
- [17] PARISI C T, BADRAN S, SEN P, et al. Modulations for terahertz band communications: joint analysis of phase noise impact and PAPR effects[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024(5):412–429. doi:10.1109/OJCOMS.2023.3344411.

作者简介:

王 颖(1989–), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹通信信号处理. email: wangying_mtrc@caep.cn.

刘 娟(1984–), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹通信总体技术与组网通信.

刘金鑫(1991–), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹通信总体技术.

林长星(1986–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹通信、高速通信调制解调技术及FPGA实现技术研究、高速实时信号处理系统设计和嵌入式系统设计..

邓贤进(1973–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为电磁场理论、仿真技术、微波技术、收发信道系统技术、太赫兹通信系统技术研究等..