

文章编号: 2095-4980(2021)05-0831-07

DTMB 外辐射源雷达纠错算法性能评估

张劲松^a, 万显荣^{*a}, 张 勋^a, 饶云华^{a,b}

(武汉大学 a.电子信息学院, 湖北 武汉 430072; b.武汉大学 深圳研究院, 广东 深圳 518000)

摘 要: 低密度奇偶检验(LDPC)码纠错算法是地面数字多媒体广播(DTMB)外辐射源雷达参考信号重构的关键技术之一。LDPC 码纠错算法可以改善噪声带来的数据误码, 但是计算复杂度高。结合图形处理器(GPU)运算能力强的优点, 本文提出了基于硬判决、混合判决、软判决的 3 类适用于 GPU 处理的 LDPC 码纠错并行算法, 并对比了 3 类算法的复杂度、纠错性能以及对雷达信号处理的影响; 最后, 给出了 GPU 并行实现方案, 对比了算法的实时化效果。仿真与实测结果论证了相较于其他算法, 软判决并行算法具有优越的纠错性能和实效性。

关键词: 地面数字多媒体广播; 外辐射源雷达; 低密度奇偶检验纠错算法; 并行实现

中图分类号: TN958.97

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020116

Performance evaluation of decoding algorithms for DTMB-based passive radar

ZHANG Jingsong^a, WAN Xianrong^{*a}, ZHANG Xun^a, RAO Yunhua^{a,b}

(a.School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China; b.Shenzhen Research Institute of Wuhan University, Shenzhen Guangdong 518000, China)

Abstract: Low-Density Parity-Check code(LDPC) decoding is one of the key steps in reference signal reconstruction of passive radar. Decoding algorithms can improve data bit errors caused by noise, but with the high complexity. Combining high memory throughput and tremendous computational horsepower of GPU graphics processor, this paper proposes three types of parallel LDPC decoding algorithms suitable for GPU processing based on hard, mixed, and soft decisions. The complexity, decoding performance, and impact on radar signal processing of the three types of algorithms are described; finally, a parallel GPU implementation scheme is given, and the real-time time-consuming of the algorithms is compared. The simulation and measured results verify that the soft decision parallel algorithm is superior to other algorithms on performance and effectiveness.

Keywords: Digital Terrestrial Multimedia Broadcast(DTMB); passive radar; Low-Density Parity-Check decoding; parallel implementation

外辐射源雷达是一种利用第三方非合作辐射源作为探测信号的新式雷达。近年来, 数字广播在全球发展迅速, 例如国外的数字广播(Digital Video Broadcasting-Terrestrial, DVB-T)、数字调幅广播(Digital Radio Mondiale, DRM)、中国的 DTMB 等, 为基于数字广播信号的外辐射源雷达提供了有利的研究条件^[1-4]。为了获取纯净的参考信号, 外辐射源雷达通常会采取基于数字信号信道编码原理的重构算法对参考信号进行提纯。数字信号编码与重构的一般流程如图 1 所示^[5-6]。

由于纠错编码广泛应用于包括 DTMB 的各种基于数字信号, 故而对于纠错算法的性能评估对于基于数字信号的外辐射源雷达具有普遍意义。文献[1]针对误码率对雷达性能的影响进行了分析, 但并未涉及到具体的纠错算法。文献[5-6]提到了将纠错算法应用于外辐射源雷达, 但并未对纠错算法在雷达信号处理中的应用进行深入的评估。

收稿日期: 2020-3-18; 修回日期: 2020-04-22

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0502403); 国家自然科学基金项目资助(61931015; 61701350); 湖北省科技创新项目资助(2019AAA061); 博士后创新人才支持计划项目资助(BX201600117); 中央高校基础研究项目资助(2042019kf1001); 深圳市科技计划项目资助(JCYJ20170818112037398)

*通信作者: 万显荣 email: xrwan@whu.edu.cn

DVB-T, DRM, DTMB 以及 4G 信号均采用 LDPC 码编码, LDPC 码的迭代纠错算法通常分为 3 类: a) 硬判决算法, 处理简单, 但门限判决引起了性能下降, 例如比特翻转(Bit Flipping, BF)算法^[7]; b) 软判决算法从概率的角度充分利用信道软信息, 性能出色, 但是计算复杂度高, 实时化难度大, 例如归一化最小和(Normalized-Min Sum, NMS)算法^[7-8]等; c) 混合判决算法吸收了软判决中软信息作为可靠度依据, 又吸收了硬判决解码算法的简便, 实现了复杂度和性能的折衷, 例如加权比特(Weighted Bit Flipping, WBF)算法^[9]等。本文将 LDPC 解码算法为纠错算法的研究重点, 分别以 BF 算法、WBF 算法、NMS 算法为研究对象, 深入评估不同纠错算法在雷达信号处理中带来的性能改善。

目前, LDPC 码纠错的最主流实现方案是在 FPGA 上运行^[10-11]。尽管 FPGA 处理速度快, 但是成本高, 开发难度大, 需要额外给设备增加硬件, 不便于应用在基于服务器处理的雷达信号处理实时化中。而近年发展起来的 GPU 由于擅长浮点运算和并行计算, 计算速度快且不需要额外增加设备, 为工程中雷达信号处理进行 LDPC 码纠错提供了良好的适用条件^[12-13]。

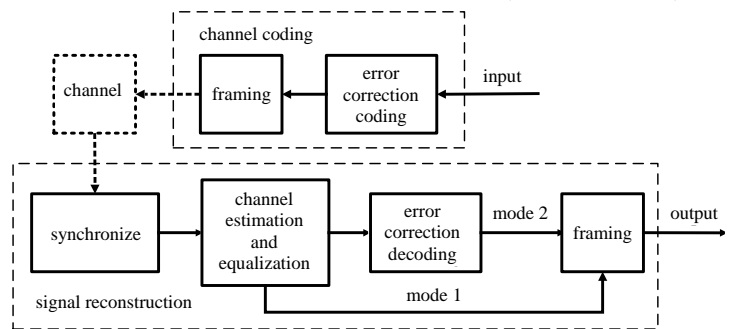


Fig.1 Process of digital signal reconstruction
图 1 数字信号的重构流程

1 LDPC 码纠错算法

1.1 DTMB 的 LDPC 码

由于信号的信噪比随着误码率的降低会提高, 因此在 DTMB 外辐射源雷达参考信号重构中添加纠错环节, 有利于提高参考信号信噪比, 对目标探测起到改善作用。DTMB 采用的纠错码为 LDPC 码。LDPC 码是一种基于矩阵构造编码和迭代译码的线性分组码, 拥有逼近香农极限的优异性能。设存在 LDPC 码 $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_N]^T$, N 为码长, 那么 \mathbf{H} 矩阵与码 \mathbf{c} 有如式(1)的关系。LDPC 码纠错即围绕式(1)展开^[7]。

$$\mathbf{H}\mathbf{c} = 0 \tag{1}$$

DTMB 标准详细描述了 \mathbf{H} 矩阵的生成方法^[14], 矩阵结构如式(2)所示。按照标准定义, \mathbf{A}_{ij} 是 127×127 大小的矩阵, 若定义 $A[i][j]=1$, 则代表 $\mathbf{A}_{ij}=\mathbf{I}$, 其中 \mathbf{I} 为单位矩阵; 若定义 $A[i][j]=m$, 则 \mathbf{A}_{ij} 为矩阵 \mathbf{I} 沿行循环移位 $m-1$ 位; 若未定义 $A[i][j]$, 则对应 $\mathbf{A}_{ij}=0$ 。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1,1} & \mathbf{A}_{1,2} & \dots & \mathbf{A}_{1,t} \\ \mathbf{A}_{2,1} & \mathbf{A}_{2,2} & \dots & \mathbf{A}_{2,t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{c,1} & \mathbf{A}_{c,2} & \dots & \mathbf{A}_{c,t} \end{bmatrix} \tag{2}$$

\mathbf{H} 矩阵在 3 种模式下的属性参数如表 1 所示。可以看到, \mathbf{H} 矩阵为稀疏矩阵, 其行重、列重均远小于其列数与行数, 同时为不规则码, 即同一码率下其行重(或列重)不完全相同。 \mathbf{H} 矩阵居大, 其中每一个“1”都对应解码时的一次资源消耗, 加上需要迭代运算, 使得实际计算十分耗时。

表 1 \mathbf{H} 矩阵各属性参数
Table1 Attribute parameters of the check matrix

mode	ratio(R)	rows(N)	columns(M)	row weight	column weight	sum of weights(L)
1	0.4	4 445	7 493	7/8	3/4/11	34 925
2	0.6	2 921	7 493	12/13	3/4/7/16	37 592
3	0.8	1 397	7 493	26/27	3/4/11	37 338

1.2 硬/软判决信息

LDPC 码迭代纠错算法的核心思想是利用 Tanner 图中变量节点和校验节点之间的联系, 通过可靠性信息在这两类节点之间的反复迭代, 以获得解码性能的改善。BF 算法在迭代中传递 0 或 1 的硬判决信息。WBF 算法、NMS 算法流程使用的是软判决信息, 通常采用对数似然比概率信息。假设信息序列服从均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯分布, 则 4QAM 的软信息可以按式(3)计算^[15]。

$$L(P_i) = -2y_i / \sigma^2 \tag{3}$$

式中： y_i 代表第 i 个接收序列； $L(P_i)$ 代表第 i 个码字的对数似然比较信息。

16QAM,32QAM,64QAM 的软判决解映射算法计算复杂，通常都采用化简的方式求取^[15-16]。

1.3 纠错算法复杂度

各算法的复杂度各有不同，一般性能越好，计算复杂度越高。对于 DTMB 的 LDPC 码，表 2 给出 3 种算法的计算复杂度。表中所有数据表示纠错算法单帧数据在一次迭代周期内，所需加法、乘法、 $\tanh/\operatorname{atanh}$ 计算、比较运算的次数。需要说明的是，表 2 的复杂度不包括计算错误图样，且忽略了求幅值、取正负的计算的统计。

表 2 纠错算法复杂度
Table 2 Decoding algorithm complexity

algorithm name	number of additions	multiplication times	$\tanh/\operatorname{atanh}$	number of comparison perations
BF	$L-N$	$L-N$	0	$2N-1$
WBF	$L-N$	$L-N+M$	0	$2N-1$
NMS	$2L+N$	$2L-N$	0	$L+N-M$

将表 1 中所定义的 3 种 LDPC 码模式下 L, M, N 代入表 2 中可知，3 种纠错算法的复杂度排序如式(4)所示。

$$NMS > WBF > BF \tag{4}$$

1.4 纠错算法性能仿真

本节对纠错算法性能进行仿真，设置仿真参数如下：LDPC 码数据为 4 000 帧，码率为 0.4，最大迭代次数取 10 次，NMS 算法中校正因子取 0.65。运算使用的服务器 CPU 为 i7-7700M，内存为 16 GB，操作系统为 64 位。图 2、图 3 分别是基于 C++ 的 3 种算法的解码效果与耗时统计，图中横轴 $E_b N_0$ 为比特信噪比，有 $SNR = E_b N_0 \times R$ 的关系。

如图 2 所示，纠错后数据若要满足 $BER \leq 10^{-2}$ ，则 BF 算法需要 $E_b N_0 \geq 7.6 \text{ dB}$ ；WBF 算法需要 $E_b N_0 \geq 6.4 \text{ dB}$ ；NMS 算法仅需要 $E_b N_0 \geq 2.3 \text{ dB}$ 。由此可知，3 种算法中，NMS 算法的信噪比增益最高，即 NMS 算法可以在更低信噪比的情况下使得数据误码率降下来。

如图 3 可知，在比特信噪比较低时，NMS 算法解码耗时显著高于其余两种算法，与 1.3 节的分析一致；随着比特信噪比升高，由于 NMS 算法的纠错耗时率先开始下降，其耗时逐渐与 WBF 算法相当，这是由于相较于其余两种算法，NMS 算法此时只需要更少的迭代次数即可完成纠错。

3 种算法的解码性能与耗时均如式(4)的排序依次由大到小。可以看到，NMS 算法相较于其他两种算法拥有优异的纠错性能，是以牺牲计算速度为代价的。

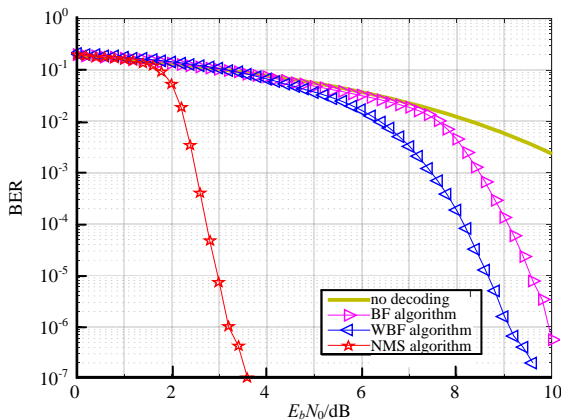


Fig.2 Performance of decoding LDPC based on DTMB
图 2 基于 DTMB 编码的 LDPC 解码性能

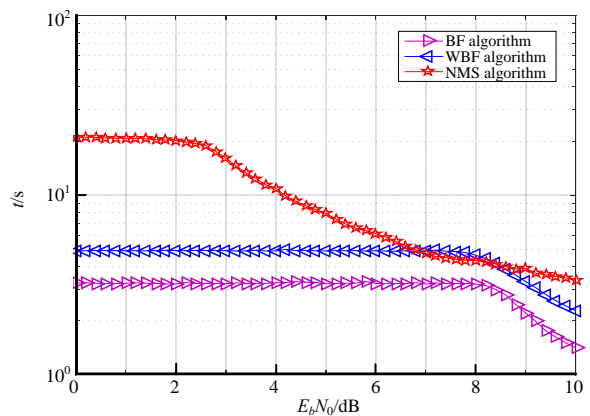


Fig.3 Time consuming of decoding LDPC based on DTMB
图 3 基于 DTMB 编码的 LDPC 解码耗时

2 纠错算法对目标探测性能的影响分析

文献[1]介绍了误码率与杂波抑制和匹配滤波的关系：a) 误码率越低，杂波抑制与匹配滤波性能越好；b) 以 4QAM 星座图为例，当 $BER \leq 10^{-2}$ 时，由误码率降低带来的匹配滤波效果改善将逐渐趋于稳定。下面，将进一步讨论不同纠错算法对杂波抑制和匹配滤波的影响。

2.1 仿真数据处理结果

本节将通过仿真验证不同纠错算法对杂波抑制和匹配滤波的影响。仿真参数设计为：LDPC 码率 R 为 0.4，星座映射为 32QAM，帧头模式为 PN420，纠错算法最大迭代次数为 10 次。假设，监测信号只有 1 个目标与 4 条多径，多径信号信噪比分别为：30:27:23:25 dB，目标信噪比是 15 dB。参考信号有 1 条主径与 2 条多径，其功率分别是 0:-9:-13 dB。参考信号分别：a) 不进行纠错、b) 经过 BF 算法纠错、c) 经过 WBF 算法纠错、d) 经过 NMS 算法；重构后数据处理分别经过杂波抑制和匹配滤波，得到图 4、图 5 的杂波抑制比和距离多普勒 (Range-Doppler, RD) 谱上的目标信噪比。杂波抑制比等于抑制前后信号能量之差。目标信噪比等于目标峰值与 RD 谱噪底之差。

通过仿真分析，本文可以将数据信噪比分为 3 块区域。区域 1($SNR < 15$ dB)：由于误码率较高，超出纠错算法纠错能力，此时不需要纠错；区域 2(15 dB $< SNR < 32$ dB)：此时纠错算法(NMS 算法最优，可以覆盖更低误码率)可以有效纠错，进行纠错的处理效果明显优于不纠错的处理效果；区域 3($SNR > 32$ dB)：此时误码率极低，所以不进行纠错的处理效果逼近纠错后的处理效果，此时并不需要纠错。

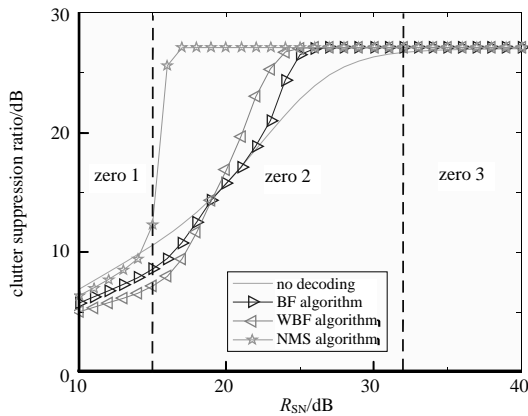


Fig.4 Effect of different decoding algorithms on clutter suppression in simulation data
图 4 不同纠错算法对杂波抑制的影响(仿真数据)

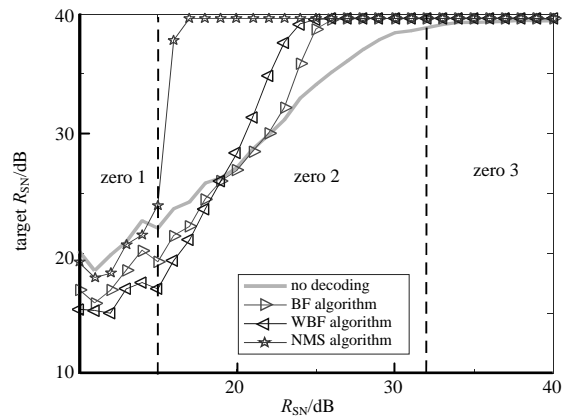


Fig.5 Effect of different decoding algorithms on matched filtering in simulation data
图 5 不同纠错算法对匹配滤波的影响(仿真数据)

2.2 实测数据处理结果

为了对 2.1 节的仿真结果进行验证，分别采用两段实测数据进行处理分析，数据信息记录如表 3 所示。

表 3 实测数据信息

Table3 Measured data information

numbering	sampling location	sampling time	sampling frequency/MHz	frame header mode	constellation pattern	LDPC rate
1	Henan Province	2019/09/08	538	PN420	16QAM	0.6
2	Inner Mongolia Autonomous Region	2018/09/18	762	PN420	4QAM	0.8

图 6~图 9 是实测数据的处理结果。为了验证纠错算法在处理一组数据中的稳定性，图 6、图 8 选取从第 1 场到第 100 场数据进行杂波抑制所得杂波抑制比，横轴是帧数序列。为了验证纠错算法对于目标信噪比提升的有效性，由于实测数据中的目标出现不连续，不便于统计 100 场的连续变化，图 7、图 9 挑选有目标的 RD 谱，截取目标所在的距离维，横轴是双基地雷达径向速度。

图 6、图 7 是数据 1 的处理结果。根据不同算法的处理差异可以发现，该数据的信噪比可对应于 2.1 节中的区域 2 信噪比较低时效果。此时 NMS 算法已表现出很好的纠错效果，对于杂波抑制比和目标信噪比都有明显的提升作用；但是 WBF、BF 算法则没有效果，甚至会带来处理效果恶化。

图 8、图 9 是数据 2 的处理结果。根据不同算法的处理差异可以发现，该数据的信噪比对应 2.1 节中的区域 3 的效果。此时 3 种纠错算法均带来杂波抑制比的提高；但是可以看出不纠错下的误码率极低，此时带来的目标信噪比并无明显改善，对该场数据没有必要进行纠错。这一结果也验证了文献[1]的描述，随着误码率改善，杂波抑制性能依然可以得到改善的情况下，匹配滤波的性能可能已经逐渐趋于稳定。

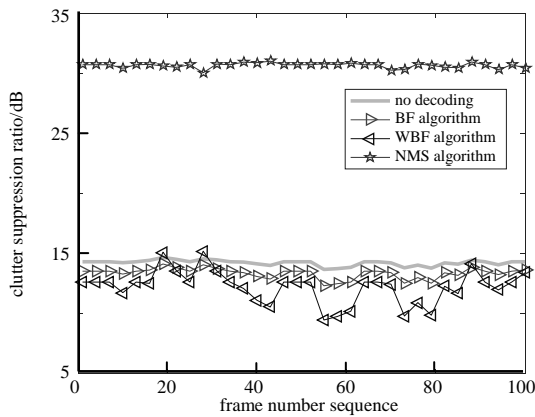


Fig.6 Effect of different decoding algorithms on clutter suppression in measured data 1

图 6 不同纠错算法对杂波抑制的影响(实测 1)

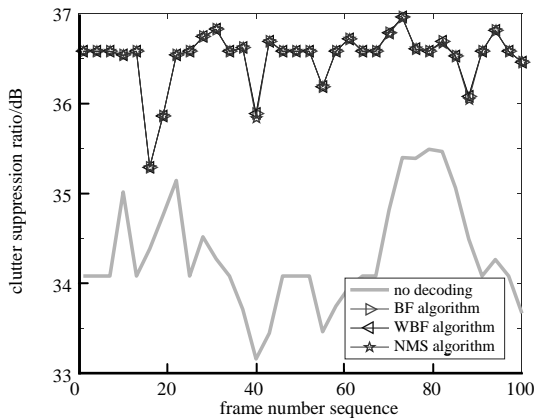


Fig.8 Effect of different decoding algorithms on clutter suppression in measured data 2

图 8 不同纠错算法对杂波抑制的影响(实测 2)

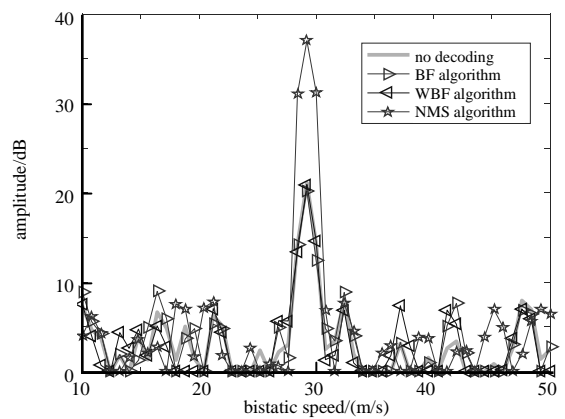


Fig.7 Effect of different decoding algorithms on matched filtering in measured data 1

图 7 不同纠错算法对匹配滤波的影响(实测 1)

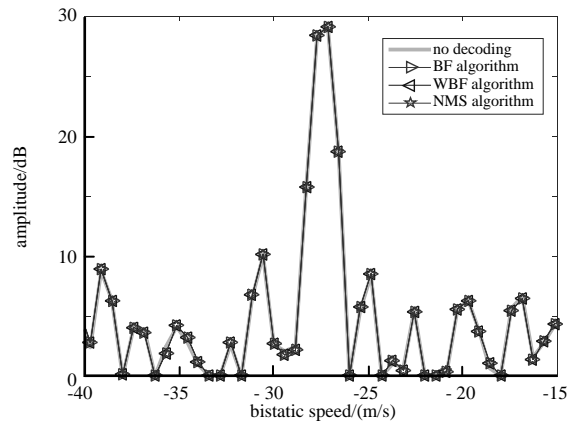


Fig.9 Effect of different decoding algorithms on matched filtering in measured data 2

图 9 不同纠错算法对匹配滤波的影响(实测 2)

两组实测数据验证了仿真数据的结果，相较于其他两种算法，NMS 算法具有更加优越的性能，能够对更低参考信号信噪比时的数据进行纠错；当参考信号信噪比较低时，数据误码率过高，超出了纠错算法的纠错能力，当参考信号信噪比较高时，数据误码率又极低，这两种情况均不需要进行纠错。

3 LDPC 码纠错算法实时化

统一计算设备结构(Compute Unified Device Architecture, CUDA)结合图形处理器数据吞吐量大和浮点计算能力强的优点，可以解决复杂的科学问题，使得基于 GPU 的通用计算成为可能。在 CUDA 编程模型中，GPU 作为设备端，主要用于并行计算；CPU 作为主机端，主要负责 GPU 设备资源调度及运行参数设置等^[17]。

3.1 NMS 算法并行实现方案

本文以 NMS 算法为例，给出实时化并行实现方案，具体方案如图 10 所示。

图中 max_iter 代表最大迭代次数。mod_multi_kernel 函数用于计算 Syn ，并由 sumSyn_kernel 函数对 Syn 进行求和并对 2 进行求模，得到 $sumSyn$ 。UpdataCheckNode 函数用于更新校验节点 U 。UpdataVariableNode 函数用于：a) 通过式(6)，更新变量

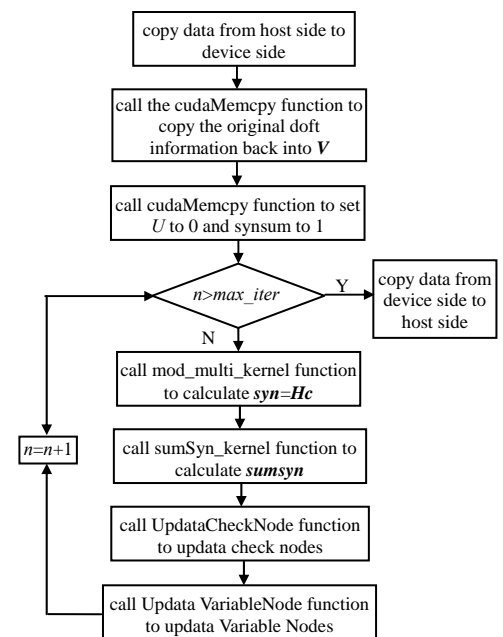


Fig.10 Parallel implementation process of NMS
图 10 NMS 算法并行实现流程

节点 V ; b) 通过式(7), 更新置信度; c) 通过硬判决获得纠错结果。 V 矩阵即式(5)~(6)中的 $L^{(l)}(r_{ji})$ 。 U 矩阵即式(5)~(6)中的 $L^{(l)}(q_{ij})$ 。

$$L^{(l)}(q_{ij}) = L(P_i) + \sum_{j' \in C_i \setminus j} L^{(l)}(r_{ji}), 1 \leq i \leq n \tag{5}$$

$$L^{(l)}(q_{ij}) = L(P_i) + \sum_{j' \in C_i} L^{(l)}(r_{ji}), 1 \leq i \leq n \tag{6}$$

本文所提方案中, block 设置为 2 维, 其中沿着 x 维的 block 用于计算同一场数据; 沿着 y 维的 block 依次计算不同场数据。为了知道所有的数据完成并行纠错后输出数据, 算法需要完成最大迭代次数 max_iter ; 判决条件 $sumSyn=0$ 内置到图 8 自定义的 4 个函数中, 若处理第 $iFrame$ 场数据的 thread 满足 $sumSyn(iFream)=0$ 的判决条件, 则会跳过处理该场数据的 thread, 直到完成 max_iter 次迭代后统一输出数据。BF 算法、WBF 算法的并行实现与 NMS 算法的流程近似, 但涉及的计算则更加简单。

3.2 并行算法消耗显存统计

表 4 为 3 种算法处理数据时消耗的显存。 P 代表并行处理时的帧数。可以看到, 3 种算法占用显存的大小排序与复杂度的排序一致, 并且在大多数显卡的显存接受范围内。

表 4 纠错算法占用显存
Table4 Video memory occupied by decoding algorithms

BF	WBF	NMS
$[(8+N) \times 4 + (6+M)] \times P(B) \approx 33.65P/32.16P/30.67P(KB)$	$[(N+M) \times 4 + (6+M)] \times P(B) \approx 50.98P/43.54P/36.10P(KB)$	$[(L+N) \times 4 + (6+M)] \times P(B) \approx 170.04P/178.97P/176.49P(KB)$

3.3 实时化效果

本节通过仿真进行基于 GPU 并行实现的纠错算法时效性测试, 在 GPU 端运行耗时为 release 模式下, 使用 NVIDIA 官方提供的 NVIDIA Visual Profile 直接测得, 多次仿真取平均, 并与基于 CPU 串行实现的纠错算法进行比较。信号处理的软硬件配置如表 5 所示。仿真数据长度为 4 000 帧, 码率选 0.4。由文献[11-12]可以看到, max_iter 并非设置越大越好, 随着 max_iter 的增加, 算法的纠错性能会趋于某一极限而不再提高; 通常 max_iter 设置小于 50, 软判决算法中设置在 10~20 即可。3 种纠错算法的实时化耗时统计如表 6 所示, 可以看到对于帧数较多的数据, GPU 并行实现显著加速, 且最终耗时极小。在 DTMB 外辐射源雷达信号处理中, 积累时间为 0.7 s 的数据, 通常实时化处理耗时为 0.5 s, 纠错算法实时化处理耗时仅在 5 ms 以内, 在工程应用中完全具备实效性; 同时, NMS 算法在并行运算中与 BF 算法、WBF 算法耗时差不多, 使其相比于 BF 算法、WBF 算法的优势更加明显。比对 GPU 端与 CPU 端纠错后的数据完全相同, 充分说明了并行实现代码的正确性。

表 5 软硬件配置

Table5 Software and hardware configuration

hardware configuration	CPU	Intel(R) Xeon(R) E5-2620
	GPU	NVIDIA Tesla K20C
software configuration	Visual Studio 2013	
	CUDA 9.0	

表 6 纠错算法耗时统计

Table6 Time-consuming of decoding algorithms

maximum number of iterations	BF			WBF			NMS		
	CPU-time	GPU-time	speedup ratio (CPU/GPU)	CPU-time	GPU-time	speedup ratio (CPU/GPU)	CPU-time	GPU-time	speedup ratio (CPU/GPU)
	/s	/ms		/s	/ms		/s	/ms	
10 times	3.5	0.3	11.7e3X	5.6	0.4	14e3X	17.0	0.4	42.5e3X
50 times	17.0	1.9	8.9e3X	25.6	2.2	11.6e3X	81.9	2.0	41.0e3X

4 结论

本文针对外辐射源雷达数字信号重构中的 LDPC 码纠错算法进行了深入研究。通过对复杂度、纠错性能、仿真与实测数据验证、以及实时化耗时、显存占用等多个角度进行对比, 验证了基于 GPU 的纠错算法并行实现方案在雷达信号处理中具有有效性与可行性; 其中, NMS 算法的并行实现最具优势, 能够在相同耗时下对更低信噪比的数据完成纠错。

参考文献:

[1] 万显荣,程熠瑶,易建新,等. DTMB 外辐射源雷达参考信号重构信道估计新方法[J]. 电子与信息学报, 2017,39(5):

- 1044–1050. (WAN Xianrong, CHENG Yiyao, YI Jianxin, et al. Nobel channel estimation of reference signal reconstruction for DTMB-based passive radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017,39(5):1044–1050.)
- [2] HAEMS H A, DAVIS L M, PALMER J. Understanding the signal structure in DVB-T signals for passive radar detection[C]// Proceedings of the IEEE Radar Conference. Arlington, VA, USA: IEEE, 2010:532–537.
- [3] YIK L L. A radar signal simulator for DAB based passive radar[C]// Proceedings of the International Radar Conference Surveillance for a Safe World Radar. Bordeaux, France: IEEE, 2009:1–5.
- [4] WAN X R, WANG J F, HONG S, et al. Reconstruction of reference signal for DTMB based passive radar systems[C]// Proceedings of the IEEE CIE International Conference on Radar. Chengdu, China: IEEE, 2011:165–168.
- [5] 王俊芳. DTMB 外辐射源雷达参考信号重构对目标探测性能影响的分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2012:37–50. (WANG Junfang. The influence of reference signal reconstruction on target detection performance in DTMB-based passive radar[D]. Wuhan, China: Wuhan University, 2012:37–50.)
- [6] 程煜媛. 采样频率偏差对 DTMB 外辐射源雷达性能影响分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2018:19–30. (CHENG Yiyao. Impact of sampling frequency offset on performance of DTMB-based passive radar[D]. Wuhan, China: Wuhan University, 2018:19–30.)
- [7] 袁东风, 张海刚. LDPC 码理论与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008:73–93. (YUAN Dongfeng, Zhang Haigang. Theory and application of LDPC codes[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2008:73–93.)
- [8] 向波. OFDM 系统中高性能 LDPC 码解码器的研究与实现[D]. 上海: 复旦大学, 2010:37–42. (XIANG Bo. Research and implementation of high performance LDPC code decoder in OFDM system[D]. Shanghai, China: Fudan University, 2010:37–42.)
- [9] 张高远. 极低信噪比下的相位差错及其采用 LDPC 码的差错控制[D]. 成都: 电子科技大学, 2015:68–71. (ZHANG Gaoyuan. Phase error at extremely low SNR and its error control using LDPC codes[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2015:68–71.)
- [10] 陈为刚, 阿卜杜拉, 梁晨驰. DTMB 中 LDPC 码编译码器的 FPGA 实现[J]. 信息技术, 2016(1):54–58. (CHEN Weigang, HAMZAH Abdellah, LIANG Chenchi. FPGA implementation of LDPC codec for DTMB[J]. Information Technology, 2016(1): 54–58)
- [11] DIGDARSINI D, MISHRA D, MEHTA S, et al. FPGA implementation of FEC encoder with BCH & LDPC codes for DVB S2 system[C]// International Conference on Signal Processing and Integrated Networks. 2019:77–78.
- [12] 陈伟, 万显荣, 张勋, 等. 外辐射源雷达多通道时域杂波抑制算法并行实现[J]. 雷达学报, 2014,3(6):686–693. (CHEN Wei, WAN Xianrong, ZHANG Xun, et al. Parallel implementation of multi-channel time domain clutter suppression algorithm for passive radar[J]. Journal of Radar, 2014,3(6):686–693.)
- [13] 张坚, 万显荣, 刘玉琪, 等. 外辐射源雷达滑窗扩展相消算法并行实现[J]. 雷达科学与技术, 2017,15(2):115–119. (ZHANG Jian, WAN Xianrong, LIU Yuqi, et al. Parallel implementation of sliding extensive cancellation algorithm for passive radar system[J]. Radar Science and Technology, 2017,15(2):115–119.)
- [14] GB20600-2006. 数字电视地面广播传输系统帧结构、信道编码和调制[S]. 中国国家标准, 2006. (GB20600-2006. Framing structure, channel coding and modulation for digital television terrestrial broadcasting system[S]. China National Standard, 2006.)
- [15] 王晓晴, 杨知行, 彭克武, 等. 一种 M-QAM 软判决解映射的简化算法研究[J]. 电视技术, 2008,32(1):17–19. (WANG Xiaoqing, YANG Zhixing, PENG Kewu, et al. Research of simplified soft-output demapping algorithm for M-QAM[J]. Digital TV, 2008,32(1):17–19.)
- [16] 杨前华, 万宇. 一种基于 LLR 软判决的 LTE 解映射简化算法[J]. 移动通信, 2014,48(8):65–71. (YANG Qianhua, WAN Yu. A simplified LTE de-mapping algorithm based on LLR soft-decision[J]. Mobile Communication, 2014,48(8):65–71.)
- [17] NVIDIA. CUDA C programming guide[M]. Beijing: Beijing Hope Electronic Press, 2017.

作者简介:

张劲松(1994–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为外辐射源雷达信号处理技术. email:757111782@qq.com.

张勋(1989–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为外辐射源雷达信号处理技术.

万显荣(1975–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新体制雷达设计, 如外辐射源雷达、高频雷达系统及信号处理.

饶云华(1975–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新体制雷达设计、无线通信网.