

2020年度浙江省信息通信技术前沿论坛

水声通信稀疏自适应均衡技术

陶 俊

水声信号处理教育部重点实验室
东南大学信息科学与工程学院

2020-11-08





目 录

1

背景介绍

2

稀疏信号处理技术

3

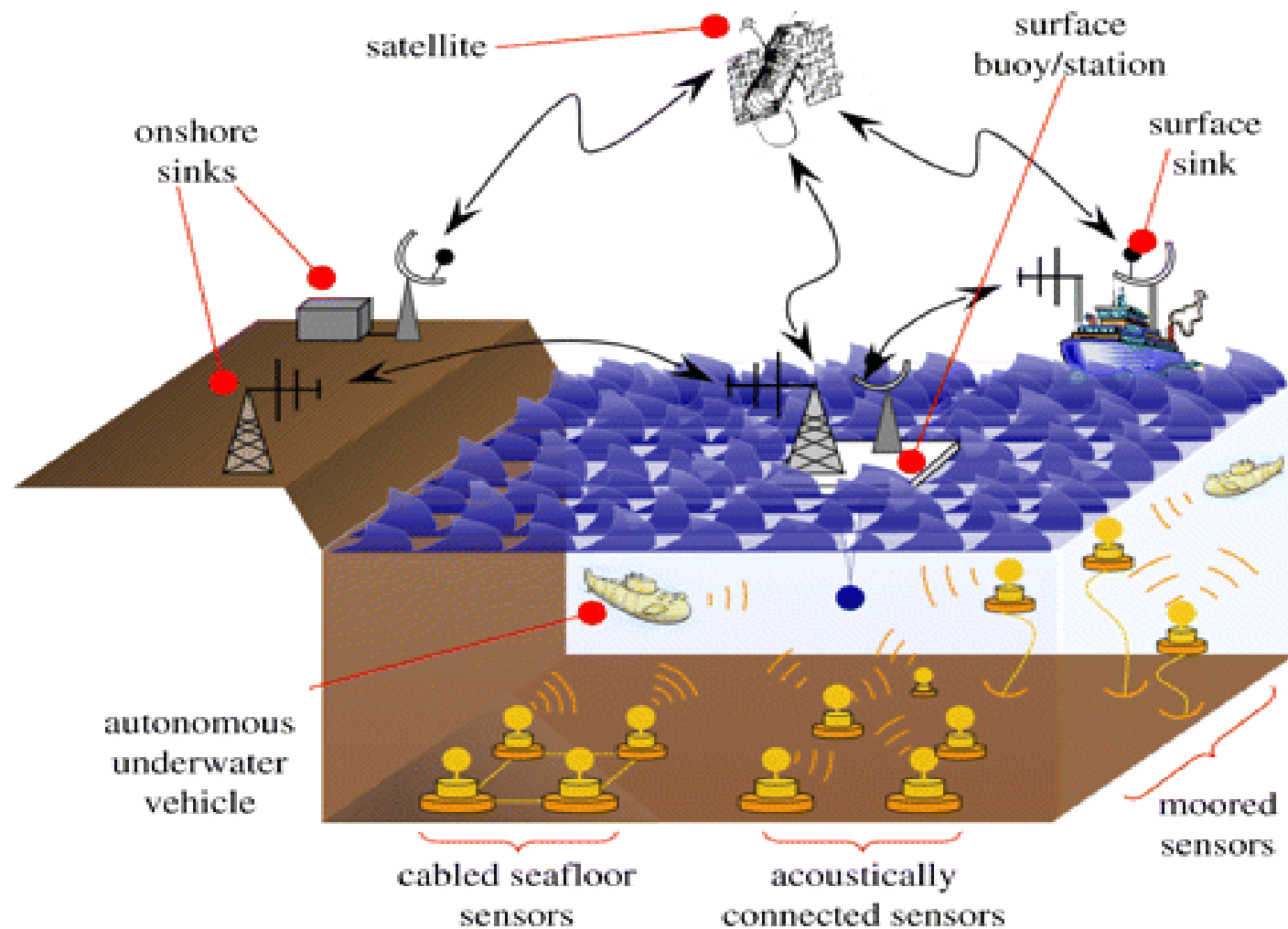
水声通信中的应用



应用需求



- 未来无线通信的发展愿景之一是实现**全覆盖**，即由陆地局部覆盖向全球深度覆盖发展，**水下通信**是实现这一目标的关键之一；
- 获取常态化海洋环境（海上空中环境、海气边界层环境、**水下环境**等）观测信息，有十分重要的军事和民用意义。需建立跨介质**海空天地一体化**信息获取、传输和处理网络；
- 在水下环境中，有线传输成本高灵活性不足，基于电磁波或光的无线传输距离受限，因此**声波**是目前已知最好的通信载体。





技术需求



- 在信息获取方面，能够实现近海与低空范围内环境与目标信息的感知，但对于水下和远海仍存在短板；
- 在核心装备（尤其是水下信息感知和通信）方面，核心技术、关键零部件较多依赖进口和国外配套

品牌	产品样图	价格	调制方式	速率
德国 		10万+	S2C	6.9-62.5 kbps
英国 		3万	FSK	40 bps
美国 		15万	OFDM	375 bps-9 kbps
澳大利亚 		7万+	DSSS/ OFDM	100-480 bps

其他品牌



TELEDYNE MARINE
Everywhere you look™

LinkQuest Inc.



develogic
subsea systems

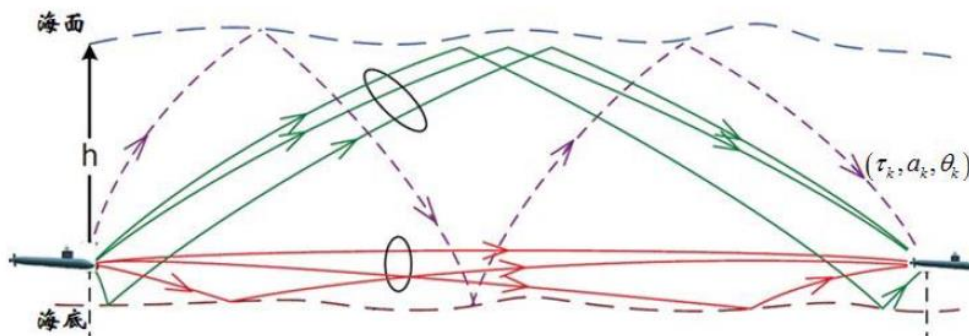
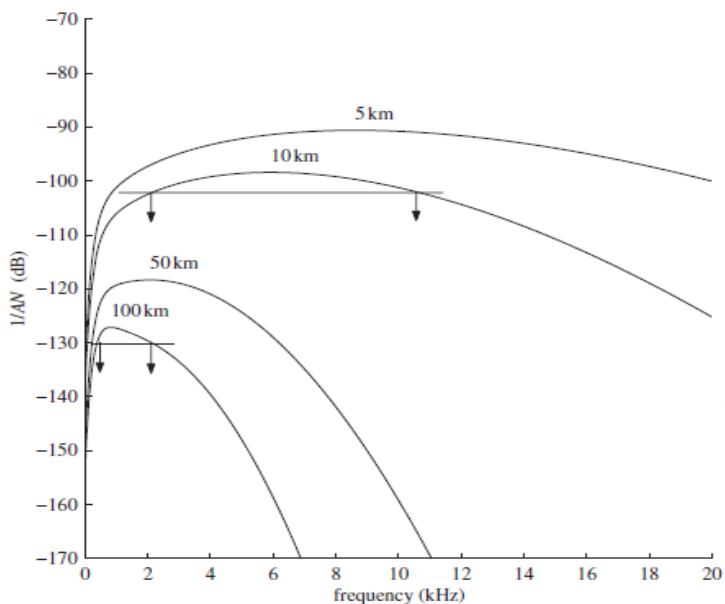




技术挑战



- **水声信道**带宽窄、时延大、变化快、多谱勒效应强
- **物理层**仍然是制约水声通信与组网的主要因素



解决方案



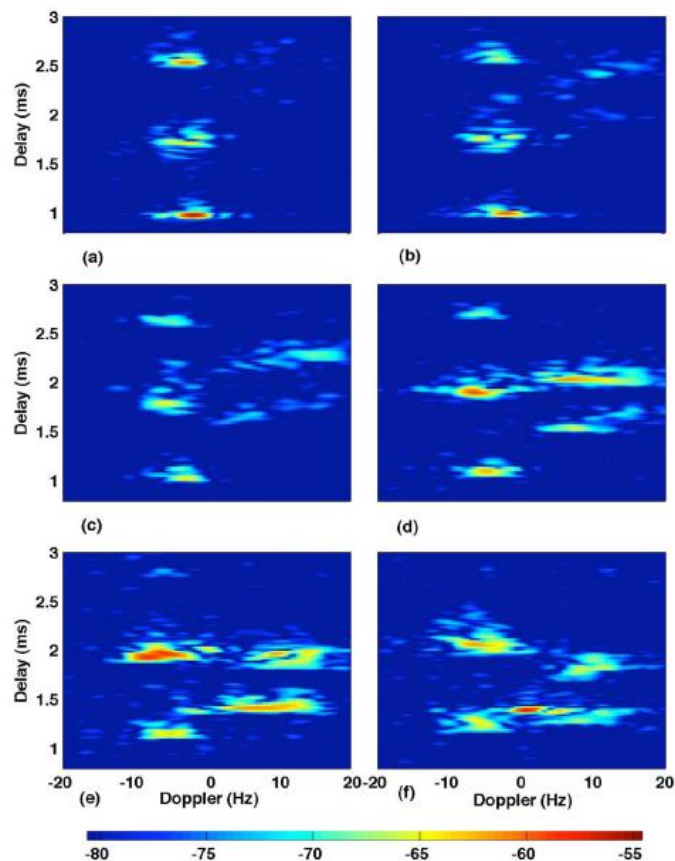
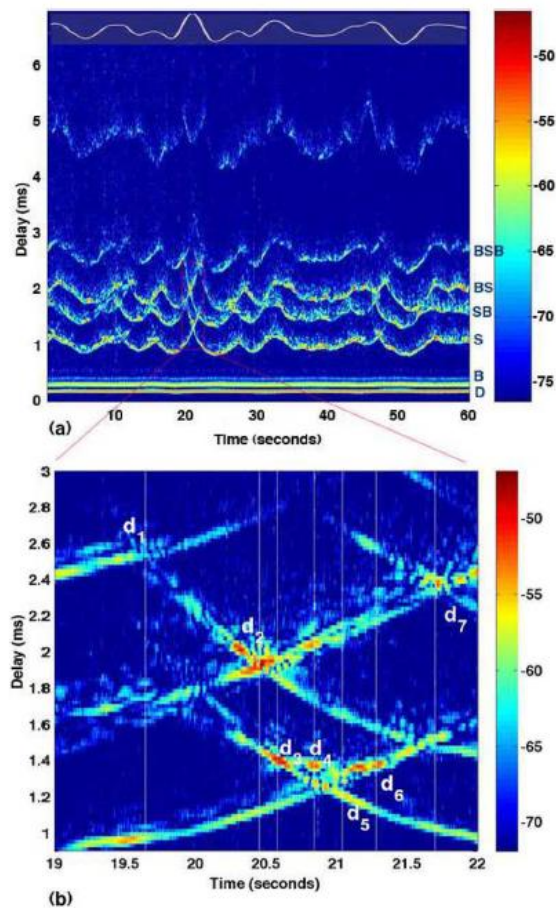
- **物理传输机制的突破**
- **提升现有的通信技术**



基带信号处理



■ 水声信道在时延域和多普勒域通常表现出稀疏性





目 录

1

背景介绍

2

稀疏信号处理技术

3

水声通信中的应用



压缩感知

批处理模式

- 凸优化法
- 组合算法
- 统计优化法
- 贪婪算法
- ...

自适应模式

- KF-CS
- LS-CS
- DIP
- DSP
- ...

稀疏自适应滤波

成比例调节

- PNLMS
- IPNLMS
- IPAPA
- NRLS
- ...

范数正则化

- L0-LMS
- L1-LMS
- SPARLS
- CR-RLS
- ...



目 录

1

背景介绍

2

稀疏信号处理技术

3

水声通信中的应用



信道估计



- 基于批处理压缩感知的水声信道估计
- 基于动态压缩感知的水声信道估计
- 基于稀疏自适应滤波的水声信道估计
- ...

信道均衡



- 时反 (TR)
 - 基于稀疏信道估计
- 直接自适应均衡 (DAE)
 - 基于稀疏自适应滤波算法
 - 基于动态压缩感知技术
- ...



$$y_{m,k} = \sum_{n=1}^N \left\{ e^{j\phi_{n,m,k}} \sum_{l=0}^{L-1} h_{n,m}(k,l) x_{n,k-l} \right\} + v_{m,k}$$

对于水声通信而言

- **慢变**抽头系数 $h_{n,m}(k,l)$ 和 **快变** 相位旋转 $\phi_{n,m,k}$ 分开表示；
- 信道长度 L 和季节、地点、载波频率、符号速率、收发机位置运动等有关系，可以从 **十几到几百**
 - **2011.08**，中国南海，“蛟龙号”，载波频率10kHz，符号速率5ksym/s，**倾斜信道**有效传输距离5569米，信道长度~**10**；
 - **2013.08**，中国南海，载波频率8kHz，符号速率4ksym/s，**水平信道**有效传输距离3500-4600米，信道长度~**80**；
 - **2018.12**，马里亚纳海沟，载波频率12kHz，符号速率4ksym/s，**垂直信道**有效距离大于1万米，信道长度>**100**；



$$\hat{x}_{n,k} = \sum_{m=1}^M e^{-j\theta_{n,m,k}} \mathbf{w}_{n,m,k}^H \mathbf{y}_{m,k} - \mathbf{f}_{n,k}^H \mathbf{d}_{n,k}$$

其中 $\mathbf{y}_{m,k} = [y_{m,k+K_1}, \dots, y_{m,k-K_2}]^T$ $\mathbf{d}_{n,k} = [\tilde{\mathbf{x}}_{k+K_3}, \dots, \tilde{\mathbf{x}}_{k-K_4}]^T$

写成更简洁的形式如下

$$\hat{x}_{n,k} = \mathbf{w}_{n,k}^H \mathbf{r}_{n,k} - \mathbf{f}_{n,k}^H \mathbf{d}_{n,k}$$

其中 $\mathbf{w}_{n,k} = [\mathbf{w}_{n,1,k}^H, \dots, \mathbf{w}_{n,M,k}^H]^H$, $\mathbf{r}_{n,k} = [e^{j\theta_{n,1,k}} \mathbf{y}_{1,k}^H, \dots, e^{j\theta_{n,M,k}} \mathbf{y}_{M,k}^H]^H$

- 如何获得相位补偿值 $\theta_{n,m,k}$? **锁相环技术**
- 如何获得前向均衡器向量 $\mathbf{w}_{n,k}$ 和后向均衡器向量 $\mathbf{f}_{n,k}$? **自适应算法**



■ 非稀疏类：RLS，LMS，NLMS，FOLMS ...

- M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. Proakis, "Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 100–111, Jan. 1994.
- B. Geller, J. M. Broissier, and V. Capellano, "Equalizer for high data rate transmission in underwater communications," in *Proc. MTS/IEEE OCEANS Conf.*, 1994, pp. I/302–I/306.

■ 稀疏类：IPNLMS，IPAPA，SZA-NLMS，DCS ...

- K. Pelekanakis and M. Chitre, "Comparison of sparse adaptive filters for underwater acoustic channel equalization/estimation," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Syst.*, Singapore, 2010, pp. 395–399.
- J. Tao, L. An, and Y. R. Zheng, "Enhanced adaptive equalization for MIMO underwater acoustic communications," in *Proc. MTS/IEEE OCEANS Conf.*, Anchorage, USA, Sep. 2017, pp. 1–5.
- Z. Qin, J. Tao, and X. Han, "Dynamic Compressive Sensing Based Adaptive Equalization for Underwater Acoustic Communications" in *Global OCEANS Conf.*, Oct. 2020, pp. 1–5.



$$\mathbf{w}_{n,k+1} = \mathbf{w}_{n,k} + \mu_w \frac{e_{n,k}^* \mathbf{G}_{n,k}^w \mathbf{r}_{n,k}}{\mathbf{r}_{n,k}^H \mathbf{G}_{n,k}^w \mathbf{r}_{n,k} + \delta_w}$$

其中

$$\left[\mathbf{G}_{n,k}^w \right]_{p,p} = \frac{1-\alpha}{2L_w} + (1+\alpha) \frac{\left| \left[\mathbf{w}_{n,k} \right]_p \right|}{2 \left\| \mathbf{w}_{n,k} \right\|_1 + \varepsilon_w}$$

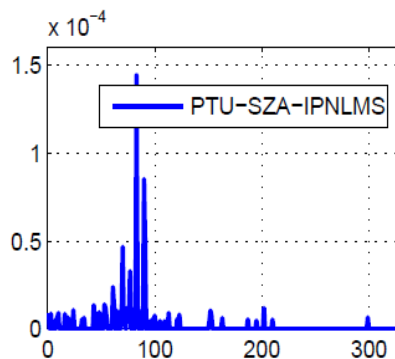
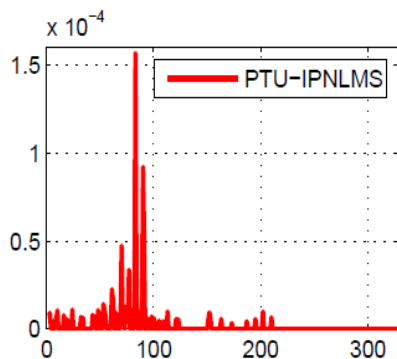
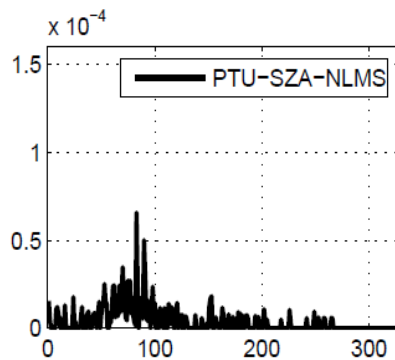
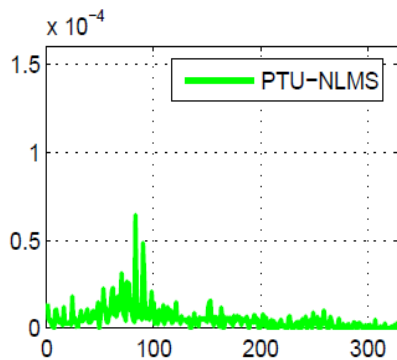
- 给大系数分配更大的更新步长从而加速收敛速度；
- 均衡器的长度 L_w 随速率增加而增加，如何保持合理的计算复杂度？**部分系数调节 (PTU)**
 - 在**训练阶段**采用满抽头均衡器，训练结束淘汰不重要系数
 - 在**符号检测阶段**，采用部分系数均衡器节省计算量



2009年美国新泽西海岸，2-3km，**1×8, 16QAM**调制

DAE \ N_{dr}	2	4	6
NLMS	35	142	223
PTU-NLMS	35	151	225
IPNLMS	250	363	397
PTU-IPNLMS	276	368	400
SZA-NLMS	79	229	289
PTU-SZA-NLMS	58	201	284
SZA-IPNLMS	277	372	414
PTU-SZA-IPNLMS	270	367	405

检测无错块数目比较（总500个块）



DAE \ N_{dr}	2	4	6
PTU-NLMS	4.29%	4.29%	4.04%
PTU-IPNLMS	39.48%	35.84%	33.69%
PTU-SZA-NLMS	27.39%	38.67%	44.32%
PTU-SZA-IPNLMS	41.92%	39.52%	38.21%

PTU稀疏自适应均衡器

复杂度节省百分比

PTU稀疏自适应均衡器结构展示

心於至善



2009年美国新泽西海岸，2-3km，**2×4, QPSK调制**

DAE \ N _{dr}	2	4	6
NLMS	0	11	25
PTU-NLMS	0	12	25
IPNLMS	203	220	222
PTU-IPNLMS	161	200	214
SZA-NLMS	7	42	81
PTU-SZA-NLMS	4	55	84
SZA-IPNLMS	210	224	225
PTU-SZA-IPNLMS	164	206	214

检测无错块数目比较（总250个块）



N_{dr} DAE	2	4	6
PTU-NLMS	8.23%	9.55%	10.29%
PTU-IPNLMS	48.64%	47.55%	46.01%
PTU-SZA-NLMS	18.39%	30.09%	35.58%
PTU-SZA-IPNLMS	53.13%	53.59%	53.24%

PTU稀疏自适应均衡器
复杂度节省百分比



2013中国三亚南海海域，3-5km，1×4, QPSK调制

N_{dr} DAE	0	2	4	6
NLMS	88	232	258	269
PTU-NLMS	96	241	261	272
IPNLMS	209	260	272	276
PTU-IPNLMS	217	266	272	275
SZA-NLMS	93	237	258	267
PTU-SZA-NLMS	109	248	268	271
SZA-IPNLMS	205	261	273	275
PTU-SZA-IPNLMS	213	266	275	277

检测无错块数目比较（总288个块）



DAE \ N_{dr}	0	2	4	6
PTU-NLMS	1.64%	1.67%	1.58%	1.45%
PTU-IPNLMS	77.74%	65.28%	54.81%	47.60%
PTU-SZA-NLMS	4.94%	26.26%	33.60%	36.65%
PTU-SZA-IPNLMS	80.78%	75.52%	71.83%	70.09%

PTU稀疏自适应均衡器

复杂度节省百分比



- 以上部分系数自适应均衡器假定训练阶段和符号检测阶段均衡器的稀疏结构不发生变化，对于快变信道该假定可能不成立，如何改进？

动态压缩感知

- **SpAdOMP** (sparse adaptive orthogonal matching pursuit)
- **SpAdOMP-APA-DAE**

$$\hat{x}_{n,k} = \mathbf{w}_{n,k}^H \mathbf{r}_{n,k} - \mathbf{f}_{n,k}^H \mathbf{d}_{n,k} = \mathbf{q}_{n,k}^H \mathbf{u}_{n,k}$$

$$e_{n,k} = x_{n,k} - \mathbf{c}_{n,k}^H \mathbf{u}_{n,k}$$

$$[\mathbf{c}_{n,k}]_p = \begin{cases} [\mathbf{q}_{n,k}]_p, & p \in \Lambda_s \\ 0, & \text{o.w.} \end{cases}$$



均衡器向量更新及支撑集的动态获取

$$\mathbf{p}_{n,k+1} = \lambda \mathbf{p}_{n,k} + \mathbf{u}_{n,k}^* e_{n,k}$$

$$\Lambda = \text{supp}(\mathbf{p}_{n,k+1}, 2s) \cup \text{supp}(\mathbf{c}_{n,k})$$

$$\tilde{\mathbf{e}}_{n,k} = \mathbf{x}_{n,k} - \left(\mathbf{q}_{n,k}^\Lambda \right)^H \mathbf{U}_{n,k}^\Lambda, \quad \mathbf{x}_{n,k} = [x_{n,k}, \dots, x_{n,k-M+1}]^T$$

$$\mathbf{U}_{n,k} = [\mathbf{u}_{n,k}, \dots, \mathbf{u}_{n,k-M+1}]$$

$$\mathbf{q}_{n,k+1}^\Lambda = \mathbf{q}_{n,k}^\Lambda + \mu \mathbf{U}_{n,k}^\Lambda \left(\left(\mathbf{U}_{n,k}^\Lambda \right)^H \mathbf{U}_{n,k}^\Lambda + \delta \mathbf{I}_M \right)^{-1} \tilde{\mathbf{e}}_{n,k}^*$$

$$\Lambda_s = \text{supp}(\mathbf{q}_{n,k+1}, s)$$



2009年美国新泽西海岸，2-3km，**1×8, QPSK调制**

N_{dr} DAE	0	2	4	6
NLMS	19	26	186	215
APA(M=2)	39	181	211	218
SpAdOMP- APA(s=60, M=1)	153	223	229	235
SpAdOMP- APA(s=80, M=1)	150	233	240	244
SpAdOMP- APA(s=60, M=2)	219	240	238	246
SpAdOMP- APA(s=80, M=2)	232	246	248	248

检测无错块数目比较（总250个块）

谢谢各位专家！

