面向工业自动化的增强型滑动窗口叠加编码

张博航、南兆军、周盛、牛志升 清华大学电子工程系，北京信息科学与技术国家研究中心，清华大学，北京 100084，中国 电子邮箱： {zhangbh20@mails., nzj660624@mail., sheng.zhou@, niuzhs@}tsinghua.edu.cn.

arXiv:2303.04406v1 [cs.IT] 8 Mar 2023

摘要—**5G 的引入改变了无线通信行业。以往几代蜂窝技术主要面向人与人之间的通信，而无线通信行业如今发现，5G 可能开启一个主要聚焦于机器间通信的时代。超可靠低时延通信在工厂自动化中的应用备受关注，因为它有望实现传统有线通信无法支持的应用。尤其是，设备间距离的缩短引发了针对这些充满干扰的信道的编码方案讨论。为满足超可靠低时延通信的时延和准确性要求，人们提出了非正交多址接入，但它也带来了相应的挑战。为应对干扰问题，人们提出了滑动窗口叠加编码的增强版本，这种编码方法在高干扰场景中能够带来性能提升。本文研究了这种编码方案在 5G 广播网络中的能力，以评估在工厂自动化场景中将干扰视为噪声时的鲁棒性。研究结果表明，在块错误率 $\approx 10^{-6}$ 的高可靠性要求区域，增强型滑动窗口叠加编码优于基准协议。**

一、引言

随着 5G 的发布及其网络后续部署，无线行业开始意识到，5G 可能与其说是人际通信的时代，不如说是机器间通信的时代。超可靠低时延通信（URLLC）的应用至关重要，因为其目标是在可靠性和时延之间实现平衡。URLLC 的要求通常是，在 1–10 毫秒时延下达到 10^{-4}至 10^{-6} 块错误率（BLER）。传统的通信性能提升方法通常要以牺牲可靠性或时延为代价。例如，混合自动重传请求（HARQ）可以提高通信链路的可靠性，但会增加时延 [1]; 而仅缩短纠错码，则会以提高误码率为代价来降低时延 [2]。随着 URLLC 应用日益普及，工厂自动化场景因结合了 URLLC 与机器通信的发展而备受关注。尤其是，编码方案对于实现 URLLC 至关重要，因为编码能够决定.....的基本极限

本论文部分受国家重点研发计划项目（中国，编号：2020YFB1806605）、国家自然科学基金（项目编号：62022049 和 62111530197）以及日立资助。

系统。其他研究已指出，在工厂自动化环境中，低密度奇偶校验码（LDPC）是一个良好的基准[4]。

以往大多数研究主要针对信道展开，研究者通常考虑采用正交多址接入（OMA）的系统。对于超可靠低时延通信（URLLC）而言，这可能并非合适的方案，因为通信系统中的一个主要时延来源是多址调度。因此，其他研究者探讨了非正交多址接入（NOMA）在 URLLC 中的应用 [5][6]。NOMA 的应用也延伸到了工厂自动化场景 [7]。NOMA 面临的一项主要挑战，是如何选择编码方案来应对其他用户带来的干扰；已有研究对相关编码方案进行了评估 [8]。在干扰问题上，其他研究者提出了滑动窗口叠加编码（SWSC），将其用于干扰信道 [9] [10]。以往有关 SWSC 的研究主要关注块错误率为 0.1 时的可达速率，而本文将聚焦于高可靠性要求的区域，其中消息错误率为 $\approx 10^{-4}$ 至 10^{-6}。URLLC 与低密度奇偶校验码（LDPC）的另一项挑战，是短码长下的误码平层问题 [11] [12]。本文将在构建相关仿真时考虑这一问题，以提供全面的比较。

本工作的主要贡献如下：

1）提出一种名为增强型滑动窗口叠加编码（ESWSC）的 SWSC 新译码方法，可解决 SWSC 中的错误传播问题，从而提升性能，同时保持与 SWSC 相同的编码效率。2）通过仿真评估 SWSC 和 ESWSC 的性能，并考察块长、块数以及块比例 α （针对 ESWSC）对编码整体性能的影响。

本文将在第 II 节首先提出一种针对 SWSC 的改进译码方法，称为增强型滑动窗口叠加编码（ESWSC）。基准协议将采用低密度奇偶校验码和修改型低密度奇偶校验码（mLDPC）。这些协议也将在第 II 节中介绍。第 III 节将讨论仿真参数并分析结果。第 IV 节的结论将总结前几节所得的结果。

II. 系统模型

本文采用室内工厂自动化场景，其中面向 N 个接收器的信息以广播方式通过下行链路发送。下行链路消息通过数据面 [13]上的标准 5G 规范发送。广播消息包含面向所有接收器的信息；若所有 N 个接收器都能解码各自的消息，则认为本轮广播成功。本文将把所提出的 ESWSC 算法与基准 SWSC 及不同版本的低密度奇偶校验码进行比较。

A. SWSC

对于需要发送的 N 个信息分组，a_i 是一个独立的信息分组，而 $a = (a_1, \ldots, a_N)$ 表示所有待发送的信息比特。b_i 是经过纠错码编码后的比特，即 a_i 经过纠错码编码后得到的比特，其中 $b = (b_1, \ldots, b_N)$ 表示纠错码编码后的所有比特。c_{i1} 和 c_{i2} 分别是 b_i 中比特的前半部分和后半部分，因此 $b_i = c_{i1} \parallel c_{i2}$，其中 $c_1 = (c_{11}, \ldots, c_{N1})$ 和 $c_2 = (c_{12}, \ldots, c_{N2})$ 分别表示 b 的前半部分和后半部分。为简单起见，图 1 中的示例展示了 2 层的 SWSC，其中 d_{i1} 和 d_{i2} 表示叠加编码层内的位置，但该方法适用于任意层数。d_{11} 中的比特将构成一个称为 c_{clean} 的已知序列。对于 d_{i1} 和 d_{i2} 的每一对叠加位置，这些层可以一起调制，形成 e_i，其中 $e = [e_1, \ldots, e_N]$ 是通过信道发送的消息。

算法 1 SWSC编码方案 1：假设要发送 N 个原始信息分组，每个分组为 a_i。2： a_i 由纠错码变为 b_i。3：将 b_i 拆分为 c_{i1} 和 c_{i2}。4：5：对于 $i \in 1 \to N$，执行以下操作。6：如果 $i = 1$，则 7：在 $d1_1$ 位置放置一个已知序列 c_{clean}。8：分别将 c_{11} 和 c_{12} 放入 d_{21} 和 d_{12}。9：否则 10：分别将 c_{i2} 和 c_{i2} 放入 d_{i2} 和 $d_{(i+1)1}$。11：结束条件判断。12：对 d_{i1} 和 d_{i2} 中的比特进行调制，形成 e_i。13：结束循环。

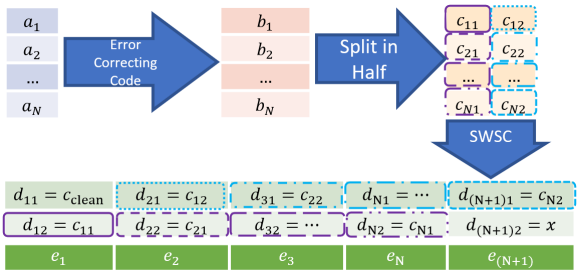

图 1. SWSC编码

SWSC 的解码过程与编码过程中的所有步骤完全相反。首先，e_1 将被解码为 d_{11} 和 d_{12}，其中 e_i 是 e_i 经过无线信道后接收到的消息。由于 d_{11} 中的 c_{clean}，c_{11} 正确的概率更高。已知消息的存在会使解码容易得多。接下来，e_2 将分别被解码为 c_{12} 和 c_{21}。c_{11} 和 c_{12} 将与 ˜ 结合，形成 b_1，由此可以得到 a_1。a_1 可以形成 b_1，进而得到 $\tilde{c_{12}}$，后者可作为新的c_{clean} 序列，用于后续的滑动窗口译码。按照算法 2 所述的方式重复这一过程，如图 2 所示。

算法 2SWSC解码方案

1：$\hat{}e_i$ 是 e_i 经过信道后接收到的消息 2：对于 $i \in 1 \to N$ 执行 3：如果 $i = 1$ 则 4：$\hat{}e_1$ 通过解调取回 d_{i1} 和 d_{i2} 中的比特 5： d_{11} 中的比特是一个已知序列 c_{clean}。这将使 d_{12} 中的比特更容易解码。 6：解调$\hat{e}_2$ 以获取 d_{21} 和 d_{22} 中的比特 7：使用来自 d_{12} 的$\hat{c}_{11}$ 和来自 d_{21} 的$\hat{c}_{12}$ 来构造 b_1 8：将 b_1 通过纠错码以获得信息包$\hat{a}_{1\sim}$ 9：通过纠错码，$\hat{a}_1$ 变为 $b_{1\sim}$ 10：b_1 拆分为 $\tilde{c}_{11}$ 和 $\tilde{c}_{12\sim}$ 11：将$\tilde{c}_{12}$ 放入 d_{21}，其作为新的干净$\hat{}$序列 c_{clean} 12：否则 13：$\hat{e}_i$ 取回 d_{i1} 和 d_{i2}中的比特 14：对于任意$\hat{e}_i$，假定 d_{i1} 位置中的序列是来自前一个编码步骤的 d_{clean}。这将使 d_{i2} 中的比特更容易解码 15：解调$\hat{}e_{(i+1)}$ 以获取放置在 $d_{(i+1)1}$ 和 $d_{(i+1)2}$ 中的比特 16：使用来自 $d_{(i)2}$ 的$\hat{c}_{i1}$ 和来自 $d_{(i+1)1}$ 的$\hat{c}_{i2}$ 来构造$\hat{}b_i$ 17：将 b_i 通过纠错码以获得信息包$\hat{a}_{i\sim}$ 18：通过纠错码，$\hat{a}_i$ 变为 $b_{i\sim}$ 19：b_i 形成 $\tilde{c}_{i1}$ 和 $\tilde{c}_{i2\sim}$ 20：将 $\tilde{c}_{i2}$ 放入 $d_{(i+1)1}$，作为下一个滑动窗口使用的新干净序列$\hat{c}_{\text{clean}}$ 21：结束条件 22：结束循环

与当前协议相比，SWSC 的主要优势在于能够利用滑动窗口块中码字各部分之间的互信息。相邻分块的这种非独立同分布特性有助于提升解码效果，因为编码链能够持续生成“干净”的消息，从而辅助后续分块的解码。

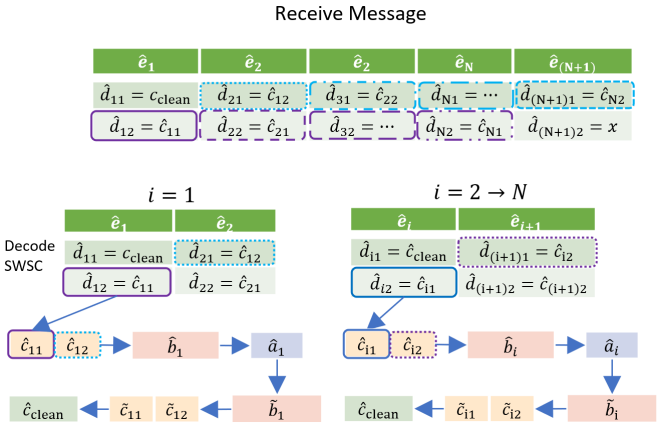

图2. SWSC译码

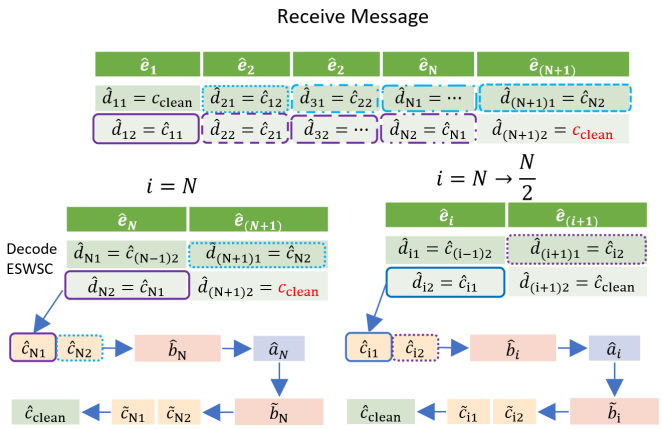

图3. ESWSC译码

B. ESWSC

SWSC 的优势和弱点都源于解码过程中相邻信息包的非独立同分布特性。当前消息能否成功解码，取决于前一条消息是否已成功解码。这会引发错误传播问题，因为单个信息包解码失败，就会导致其余码被错误解码。为解决这一问题，本文提出 ESWSC，作为解码 SWSC 编码链的替代方法。消息的前一部分仍以相同方式解码，而从 SWSC 尾部开始的 $0 \le \alpha \le 0.5$ 比例分块将采用反向解码。首先解码c_{N2} 比特序列，并借助位于 $d_{(N+1)2}$ 的干净消息，再将其与 c_{N1}结合，以进行纠错码处理。如图 3 所示。当 $\alpha = 0$时，码将按照与 SWSC 相同的方式解码；而 $\alpha = 0.5$ 则是最大限度提高解码成功率的理想方法。 α 之所以取值有一个范围，是因为帧中的某些信息包可能受到时延限制。这要求对 SWSC 进行固定排序，并可据此调整 α 。一般而言，大多数情形并不受整体时延约束，但本文在仿真中考虑了 α 的影响。

C. 消息错误率

消息错误率（MER）可通过求出 $P(a \neq \hat{a})$ 来计算。为了根据此定义评估 ESWSC 和 SWSC 的性能，将使用若干概率。第一个概率是在 SWSC 或 ESWSC 译码过程中，成功译码第一个信息包的概率 $P_{\text{clean}} = P(a_1 = \hat{a}_1)$。对于任何其他信息包 a_i，在前一条消息成功译码的条件下成功译码该信息包的概率为 $P_{\text{assumed}} = P(a_i = \hat{a}_i | a_{(i-1)} = \hat{a}_{(i-1)})$。作为 BLER 的函数，MER 的表达式如下：

$$\text{MER} = 1 - (1 - \text{BLER})^N \tag{1}$$

一些 MER 值对应的块错误率如下表 I 所示。

表I MER值对应的近似BLER值

MER	N=20	N=50	N=100
10^{-1}	$\approx 5.25 \times 10^{-3}$	$\approx 2.10 \times 10^{-3}$	$\approx 1.05 \times 10^{-3}$
10^{-2}	$\approx 5.00 \times 10^{-4}$	$\approx 2.00 \times 10^{-4}$	$\approx 1.00 \times 10^{-4}$
10^{-3}	$\approx 5.00 \times 10^{-5}$	$\approx 2.00 \times 10^{-5}$	$\approx 1.00 \times 10^{-5}$
10^{-4}	$\approx 5.00 \times 10^{-6}$	$\approx 2.00 \times 10^{-6}$	$\approx 1.00 \times 10^{-6}$

对于总数为 N 的信息包，SWSC 中所有信息分组均正确的概率为：

$$P_{\text{SWSC}} = P_{\text{clean}} \times (P_{\text{assumed}})^{(N-1)} \tag{2}$$

与此同时，ESWSC的性能表达式为：

$$\begin{aligned} P_{\text{ESWSC}} &= \left(P_{\text{clean}} \times (P_{\text{assumed}})^{(N/2-1)}\right)^2 \\ &= (P_{\text{clean}})^2 \times (P_{\text{assumed}})^{(N-2)} \end{aligned} \tag{3}$$

由于可以得知

$$P_{\text{clean}} \ge P_{\text{assumed}} \tag{4}$$

因此

$$P_{\text{ESWSC}} \ge P_{\text{SWSC}} \tag{5}$$

对于MER

$$\text{MER}_{\text{ESWSC}} \le \text{MER}_{\text{SWSC}} \tag{6}$$

*D. LDPC*基线

当前 5G 标准规定数据信道应使用 LDPC码，并将其作为基准进行比较 [13]。LDPC编码具有独立同分布 的特性，因此码的调制堆叠顺序并不重要。为便于比较，LDPC 将以类似于 SWSC 的方式进行堆叠构造，但不使用滑动窗口偏移。与 ESWSC 比较时，需特别注意， α 会导致总时延约束有所不同。这意味着，可以将满足 α 约束的码段合并起来，构成块长更长的 LDPC 码，从而更好地

利用香农定理。该 mLPDC 可与 ESWSC 进行公平比较，因为对于消息中的信息包，两种方法的时延约束完全相同。这是对他人研究成果的一项改进[14] ；此前的研究表明，在保持总时延不变的情况下，将短码块长度区域内的分块串接起来，可以改善误差性能。

III. 仿真

我们将建立一个简单的仿真，其中若干接收器分布在集中式控制器周围。信道参数根据 NYUSIM [15]计算。所需信道数量根据室内仿真场景的默认参数随机生成，如表II和表III所示。共生成 $N = 100$ 个分块，并根据需要通过均匀分布随机选取适当数量的传感器用于 $N \leq 100$ 。仿真器的确切取值如表II和表III所示。

表IINYUSIM信道参数

数值名称	数值
场景	InH
频率 (GHz)	28
大气压力 (mbar)	1013.25
湿度 (%)	50
射频带宽 (MHZ)	800
温度(°C)	20
极化	同极化
环境	NLOS
发射端与接收端间距下限(m)	10
发射端与接收端间距上限 (m)	50
用户终端高度 (m)	1.5
基站高度 (m)	3
接收位置数量	100
发射功率（dBm）	30
空间一致性	Off
人体遮挡参数	Off

表III NYUSIM 天线属性

值名称	值
发射阵列类型	ULA
接收阵列类型	ULA
发射天线单元数量 Nt	4
接收天线单元数量 Nr	4
发射天线间距（以 λ为单位）	0.5
接收天线间距（单位： λ）	0.5
每行发射天线单元数 Wt	1
每行接收天线单元数 Wt	1
发射天线方位面半功率波束宽度（°）	10
接收天线方位面半功率波束宽度（°）	10
发射天线俯仰面半功率波束宽度（°）	10
接收天线俯仰面半功率波束宽度 (°)	10

对于编码参数本身，将采用标准的 5G 下行链路模型，并选用表 IV 所示的以下默认编码参数。由于 5G 下行链路数据信道要求使用低密度奇偶校验码，因此将选择该编码方案，并采用适当的参数 CRC 附加字段均遵循相关的 5G 标准[13]。为确保编码效率相同，基于低密度奇偶校验码的编码方案将采用低于基于 SWSC 的方案的码率，并根据具体情况进行调整，以确保基于低密度奇偶校验码的方案发送的总比特数将 ≥于基于 SWSC 的方案。这是因为基于 SWSC 的方案需要额外的半块长度。除非为获得结果而需要调整，否则均采用以下默认参数。

表 IV 5G 下行链路参数

数值名称	数值
传输块长度 (比特)	200
码率 (/1024)	460
信噪比（dB）	16
α	0.5
N	100
调制	QPSK

实现多输入多输出（此处为 4×4信道）信道预编码和解码的最优方式是奇异值分解（SVD） [16]。

使用表 IV 所示的默认参数完成了 250 次仿真，结果见下方图 4。更改编码参数时，可以将其作为比较基准。

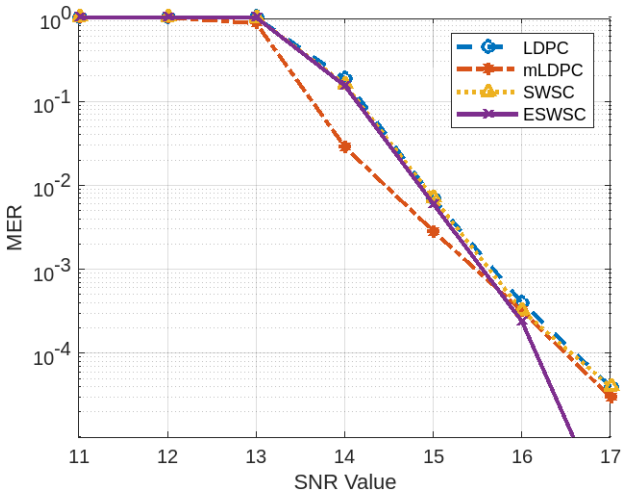

图 4. 默认仿真结果

A. 码块长度的影响

如图 5 所示，当块长从 200 比特改为 100 比特时，各种编码的误码率也随之变化。在信噪比=14下，编码的成功率有所提升；此时，超可靠低时延通信的要求并不那么明显，而且短块长编码的 MER 实际上更低。这一结果与其他研究的发现相似：他们观察到，在某些长度范围内，较短的块长可能会改善低密度奇偶校验码的性能 [12]。但是，当关注超可靠低时延通信所要求的极低 MER 区间时，

长块长编码的影响表明，在相同信噪比下，它能够实现更低的MER。

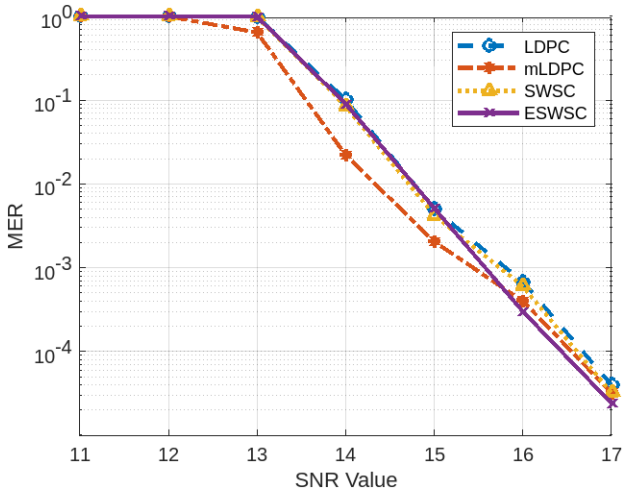

图 5. 码块长度=100

B. 块数的影响 N

编码块的数量对误差性能的影响最大，因为只有在所有消息都被正确解码时，整个消息才被视为成功。减少块数会导致误码率性能明显下降。对于基于 SWSC 的方法，半个块的开销并未造成预期中那么大的性能变化。这与原始 SWSC 论文 [10] 中所作的假设一致，因为该论文认为无需考虑额外的半个码块长。图 6 所示的极少块数略优于图 7 所示的中等块数，而后者的表现略好于图 4 中基准所示的大量设备场景。

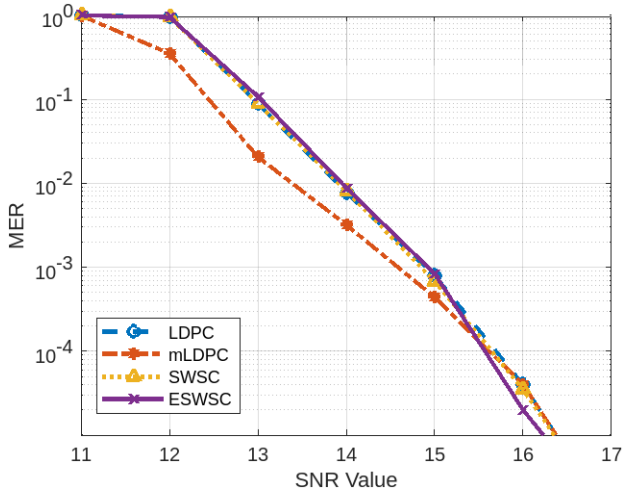

图 6. N=20

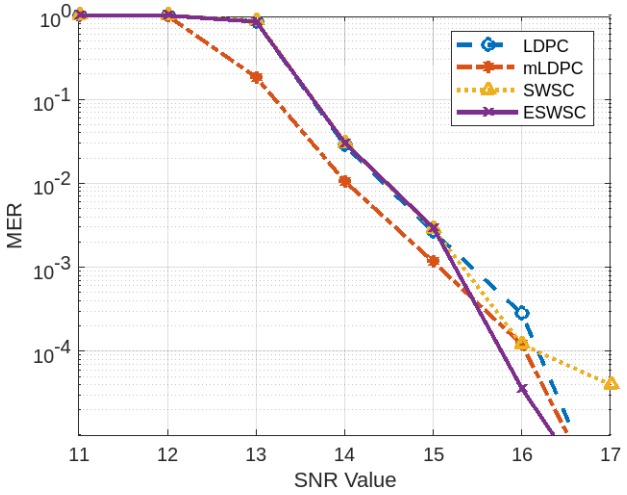

图 7. N=50

C. 块比例的影响 α

The α 值是影响码的结果的重要因素。为确保消息中的所有信息分组都满足超可靠低时延通信的要求，mMLC 和 ESWSC 中的 α值可以进行调整。如下图所示，降低该值会导致误差性能下降。如图 8 所示，在低可靠性要求区域，MER 从 $\alpha = 0.5$ 到 $\alpha = 0.2$ 的整体改善约为 4-7%。在对数图的高可靠性区域中，这种下降更加明显。可以观察到，在低可靠性区域，mMLC 的表现优于 ESWSC；而在高可靠性区域则恰好相反。这表明，当存在超可靠低时延通信等高可靠性要求（例如工业自动化）时，ESWSC 是一个不错的选择。

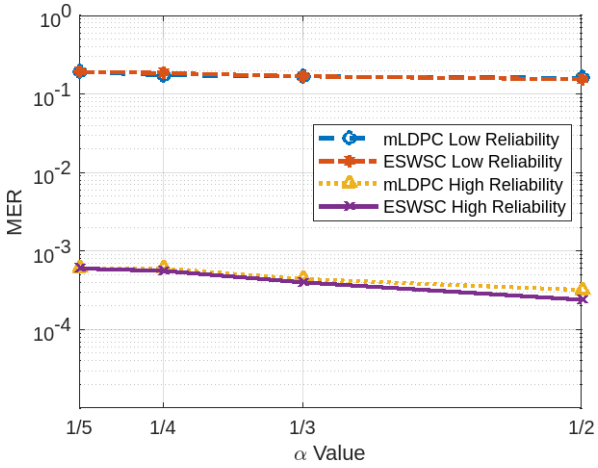

图 8. α 在信噪比=14 dB 时的取值（低可靠性），信噪比=16dB 时的取值（高可靠性）

IV. 结论

总而言之，可以看出，SWSC 和 ESWSC 并非总能在所有成功率区域中取得最佳结果

而且通常难以胜过作为基准的低密度奇偶校验码。在符合超可靠低时延通信要求的低 MER 速率区域，ESWSC 和 SWSC 通常表现优于低密度奇偶校验码和修改型低密度奇偶校验码。当块数减少时，所有编码方案的性能都如预期般有所提升。块长缩短时，基于 SWSC 的编码方案在高可靠性要求区域仍能保持微弱的性能优势，但在低可靠性要求区域则表现较差。在改变 α 值的比较中也呈现出这一趋势：ESWSC 在块错误率 $\approx 10^{-6}$ 的高可靠性区域优于 mLPDC，但在块错误率 $\approx 10^{-3}$ 的低可靠性要求区域则表现不佳。

参考文献

[1] L. Vangelista 和 M. Centenaro，“物联网混合自动重传请求方案的性能评估”，*Computers*，第 7 卷，第 4 期，2018 年。

[ ] 2073 431 7 4 48 在线。可访问：https://www.mdpi.com/ - X/ / / M. Bennis、M. Debbah 和 H. V. Poor，“超可靠低时延无线通信：尾部、风险与规模”，*IEEE*论文集，第 106 卷，第 10 期，第 1834–1853 页，2018 年。[3] 3GPP，“URLLC 数据信道编码的遗留问题 ”，第三代合作伙伴计划（3GPP），讨论与决策 1904849，04 18，版本 R1-1904849。 [在线]。可访问：https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2996

[4] L. Fanari、E. Iradier、I. Bilbao、R. Cabrera、J. Montalban 和 P. Angueira，“工厂自动化场景中 IEEE 802.11be 不同信道编码技术的比较”，*Sensors*，第 21 卷，第 21 期，2021 年。 [在线]。可访问：https://www.mdpi.com/ 1424-8220/21/21/7209[5] M. Amjad 和 L. Musavian，“非正交多址在超可靠低时延通信中的性能分析”，载于 *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*，2018 年，第 1–5 页。[6] Y. Liu 、Y. Deng、M. Elkashlan、A. Nallanathan 和 G. K. Karagiannis，“URLLC 服务的免授权接入分析”，*IEEE*通信领域精选期刊，第 39 卷，第 3 期，第 741–755 页，2021 年。[7] J. Montalban、E. Iradier、P. Angueira、O. Seijo 和 I. Val，“面向工业自动化的基于非正交多址的 802.11n”，*IEEE Access*，第 8 卷，第 168 546–168 557 页，2020 年。[8] A. Munari、F. Clazzer、O. Simeone 和 Z. Utkovski，“后5G系统中物联网的免授权接入：接收分集的潜力”，载于 *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*，2020 年，第 1–5 页。[9] L. Wang、Y.-H. Kim、C.-Y. Chen、H. Park 和 E. S.as.o˘glu，“滑动窗口叠加编码：双用户干扰信道”，*IEEE*信息论汇刊，第 66 卷，3316，2020 6，3293，第 号，页 – 。[10] H. Park、Y.-H. Kim 和 L. Wang，“通过滑动窗口叠加编码进行干扰管理”，载于 *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*，2014 年，第 972–976 页。[11] P. Lee、L. Dolecek、Z. Zhang、V. Anantharam、Borivoje 和 M. J. Wainwright，“低密度奇偶校验码中的误码平层：快速仿真、界和硬件仿真”，载于 *2008 IEEE International Symposium on Infor- mation Theory*，2008 年，第 444–448 页。[12] T. Bai、C. Xu、R. Zhang、A. F. Al Rawi 和 L. Hanzo，“脉冲噪声污染下混合自动重传请求辅助的正交频分复用系统性能：有限长度低密度奇偶校验码分析”，*IEEE Access*，第 7 卷，14 123，2019 年 14 112 页 – 。[13] 3GPP，“第15版说明；第15版工作项目摘要”，第三代合作伙伴计划（3GPP），技术报告（TR），2019 年 10 月 21 日 3 915，21 21 915，版本 . . 。[14] G. Durisi、T. Koch 和 P. Popovski，“利用短数据包实现大规模、超可靠和低时延无线通信”，*IEEE*论文集，第 104 卷，第 9 期，第 1711–1726 页，2016 年。[15] S. Ju、O. Kanhere、Y. Xing 和 T. S. Rappaport，“具有空间一致性和人体遮挡功能的毫米波信道仿真器 NYUSIM”，载于 *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*，2019 年，第 1–6 页。

[16] J. Andersen，“具有双端多单元阵列的已知随机信道的阵列增益和容量”，*IEEE*通信领域精选期刊，第 18 卷，第 11 期，第 2172–2178 页，2000 年。