

## 无源物联网的编码技术研究

杨义冰<sup>1</sup>, 许荣涛<sup>2,3</sup>, 陈霞<sup>2</sup>, 王公仆<sup>1</sup>, 艾渤<sup>2,3</sup>

(1. 北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100091; 2. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100091;  
3. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100091)

**摘要:** 无源反向散射通信技术能让传感器摆脱电池的束缚, 避免繁杂的人工维护, 有效降低传感器的成本。无源反向散射通信技术已被认为是实现无源物联网的关键技术之一。由于无源传感器节点资源受限, 如何利用编码技术提高系统可靠性成为无源物联网的挑战性难题。聚焦无源物联网无源节点的编码和解码技术, 首先, 系统阐述传统信道编码发展历程, 以及现有的 RFID 信道编码解码方案; 然后, 选择适合无源反向散射通信技术的 3 种编码方案; 最后, 仿真比较这 3 种编码方案的性能并总结优缺点。

**关键词:** 无源物联网; 反向散射; 编码

**中图分类号:** TN919

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00340

## Coding technology of passive internet of things

YANG Yibing<sup>1</sup>, XU Rongtao<sup>2,3</sup>, CHEN Xia<sup>2</sup>, WANG Gongpu<sup>1</sup>, AI Bo<sup>2,3</sup>

1. School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China  
2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China  
3. The State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China

**Abstract:** Passive backscatter communication can free wireless sensors from limited-life batteries and heavy manual maintenance, and will also reduce their hardware cost. Passive backscatter communication is one of the key technologies to realize the passive internet of things (IoT). Due to the limited resources of passive sensor nodes, how to use coding technology to improve system reliability has become a challenging problem for passive IoT. The coding and decoding technologies of passive nodes in the passive IoT were focused on. Firstly, the development history of traditional channel coding and the existing RFID channel coding and decoding schemes were systematically expounded. Then, three suitable coding schemes were selected for passive backscatter communication technology. Finally, the performance of these three encoding schemes were compared by simulation and the advantages and disadvantages were summarized.

**Key words:** passive internet of things, backscatter, coding

### 0 引言

物联网被视为继计算机、互联网之后的新一轮信息化浪潮, 通过大规模接入设备使“万物互联”成为现实。作为物联网的重要组成部分, 传感器节点需要精准地获取数据故功率消耗较高, 导致应用场景受限。在无源物联网中, 终端传感器节点可以

从环境中获取能量, 支持其完成感知、数据的采集与计算以及传输等工作, 并采用反向散射通信技术传递信息。反向散射通信技术能在有效保证低功耗甚至零功耗的同时提供低速率通信, 并且不需要无线传感器配备有源射频部件, 同时能有效降低无线传感器的成本。

在传统的点到点通信系统中, 由于无线信道的

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2023-04-09

通信作者: 许荣涛, rtxu@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2021YFB3901302)

**Foundation Item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB3901302)

开放性,信道极易受干扰、多径衰落和噪声等非理想性因素的影响,使信号在传输过程中发生畸变和失真,导致误码。因此,利用编码技术可以降低信道噪声和干扰的影响。而对于无源反向散射通信系统<sup>[1-3]</sup>,除了这些非理想性因素,还存在双重无线信道衰落,同时无源节点(如标签、传感器等)能源有限且计算资源受限,所以应采用低功耗、低复杂度的编码方式来提高通信可靠性和距离<sup>[4-6]</sup>。本文聚焦于无源反向散射通信系统中的编解码技术,系统阐述了各种信道编解码方式及其发展历程,分析并选取了适合无源反向散射通信系统的编解码方案;仿真比较这3种编码方案的性能并总结优缺点,得出适合无源反向散射通信系统的编解码方案。

## 1 传统信道编码

信道编码的发展历程如图1所示,在20世纪,人们认为只有当传输速率减至零时,有噪信道中进行通信的错误概率才能达到任意小。直至1948年Shannon<sup>[7]</sup>提出了有噪信道编码定理:当信道的实际信息传输速率 $R$ 不超过信道容量 $C$ 时,一定存在某种信道编码方法,当码长充分大时可以实现任意高的传输可靠性,并给出了构造随机长码和最大似然译码的思路,为信道编码的发展和研究奠定了信息理论的基础。

1950年,Hamming<sup>[8]</sup>提出了第一种差错控制编码——汉明码,该编码方案简单易实现,在修正错误内存上得到了重要应用。汉明码的基本原理是在每组有效信息位末添加对应的奇偶校验位,以检测和纠正单比特错误或检测多比特错误。汉明码纠错能力有限且存在冗余位使得编码效率较低,1954年,Reed-Muller(RM)码<sup>[9]</sup>的出现改善了这一问题。Muller根据多元布尔函数构造出二元码典例,增强了在码字长度和纠错方面的适应能力。Reed给出有效译码算法,使译码速度得到了提升。

1957年,Prange提出了循环冗余校验(CRC, cyclic redundancy check)码,也称循环码。由于其码字具有循环移位特性,任意码组循环移位后仍然是该编码中的一个码组,简化了用于硬件实现的编译码结构。1959—1960年,Bose、Ray-Chaudhuri<sup>[10]</sup>及Hocquenghem<sup>[11]</sup>各自独立发现了二元线性循环

码,即BCH码。与以往由码结构估计纠错能力不同,BCH码是第一种可由纠错个数需求构造码结构的纠错码,并具有纠正多个随机错误的能力。1960年,Reed和Solomon<sup>[12]</sup>构造出了多进制BCH码——Reed-Solomon(RS)码,这是一种多元最大距离可分的纠错码,其最小距离达到了Singleton限。因而,RS码在现代数字通信、数据存储系统中得到广泛的应用。

1970年,Goppa<sup>[13]</sup>发现的Goppa码是第一种具有好码特性的代数几何码。以上分组码主要存在两大局限:一是必须收到全部码字之后才能开始译码,当码长超过一定长度时会引入一定的时延,从而增益损失较大;二是需要精确的帧同步。针对以上问题,1955年Elias<sup>[14]</sup>提出了卷积码。卷积码充分利用了各个信息组之间的相关性,其编码产生的校验位不仅与当前信息码组有关,还与前面若干时刻输入编码器的信息码组有关。1967年,Viterbi<sup>[15]</sup>提出了卷积码的最大似然译码算法Viterbi算法。相比于分组码而言,译码过程不是分组而是连续进行,因此不必保证收到全部码字就可以开始译码,译码时延相对较低。

1982年,Ungerboeck<sup>[16]</sup>把信道编码与调制相结合,提出了网格编码调制(TCM, trellis coded modulation)技术并获得了可观的编码增益。1993年,Benou等<sup>[17]</sup>提出了并行级联卷积码即Turbo码,其将卷积码和随机交织器结合在一起,使“随机编译码”成为可能,同时在译码方式上完成了从早期的代数译码到软输出迭代译码<sup>[18-19]</sup>的转变。实验在加性白高斯噪声(AWGN, additive white Gaussian noise)的环境下,采用编码效率 $R=1/2$ 、交织长度为65 536的Turbo码,经过18次迭代译码后,在 $E_b/N_0=0.7$  dB时,其误码率到达 $10^{-5}$ ,与Shannon限只相差0.5 dB,这是编码理论的重要里程碑。随着对Turbo码的深入研究,1997年,Mackay等<sup>[20-21]</sup>重新发现了Gallager<sup>[22]</sup>于1962年提出的具有稀疏校验矩阵的分组纠错码——低密度奇偶校验(LDPC, low density parity check)码,其性能与Turbo码相似。直到2001年Chung<sup>[23]</sup>的实验:1/2码率的非正则LDPC码在AWGN信道中,与Shannon限相差

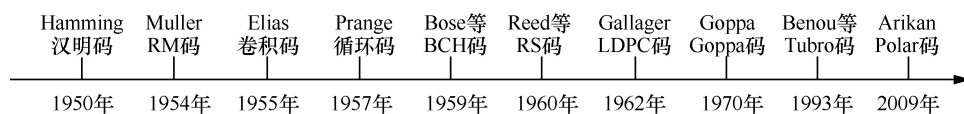


图1 信道编码的发展历程

不超过 0.004 5 dB。当 BER=10<sup>-6</sup> 时，距离信道容量 0.04 dB，结果表明 LDPC 码的性能优于 Turbo 码。虽然 Turbo 码以及 LDPC 码已经距离 Shannon 限非常小，但是始终没有达到信道容量。2008 年，在国际信息论研讨会（ISIT, International Symposium on Information Theory）上，Arikan<sup>[24]</sup>提出了信道极化的概念，并在 2009 年提出了极化（Polar）码，是一种能够被严格证明在二进制输入对称离散无记忆信道下达到信道容量的编码，并且具有线性复杂度的编译能力。信道编码的贡献见表 1。

编码方式	贡献
汉明码 <sup>[8]</sup>	第一种差错控制编码
RM 码 <sup>[9]</sup>	提高了在码字长度和纠错能力方面的适应能力，译码速度得到了提升
BCH 码 <sup>[10-11]</sup>	第一种可由纠错个数需求构造码结构的纠错码，具有纠正多个随机错误的能力
RS 码 <sup>[12]</sup>	多元最大距离可分的纠错码，其最小距离达到了 Singleton 限
Goppa 码 <sup>[13]</sup>	第一种具有好码特性的代数几何码
卷积码 <sup>[14]</sup>	编译码过程连续进行，不必保证接收到全部码字就可以开始译码，译码时延相对较低
Turbo 码 <sup>[17]</sup>	将卷积码和随机交织器结合在一起，使“随机编译码”成为可能，并在译码方式上完成了从代数译码到软输出迭代译码的转变
LDPC 码 <sup>[22]</sup>	稀疏校验矩阵的分组纠错码，且性能优于 Turbo 码
Polar 码 <sup>[24]</sup>	第一种能够被严格证明在二进制输入对称离散无记忆信道下达到信道容量的编码，并具有线性复杂度的编译能力

## 2 传统 RFID 信道编码

传统的反向散射通信系统如射频识别（RFID, radio frequency identification）系统已经被广泛应用于日常生活中，其工作原理如下，阅读器通过发射天线发送一定频率的射频信号为无源电子标签提供能量，无源电子标签被激活后通过调整无源电子标签天线接口的阻抗，进而改变天线接口的反射系数，将自身信息经过内置射频天线传回给阅读器。现行国际标准 ISO 18000-6<sup>[25]</sup>概述了射频信号在 860~960 MHz 频率范围内运行的无源反向散射 RFID 系统。前向与反向链路的编码方式见表 2，无源反向散射 RFID 系统模型如图 2 所示，该系统包括阅读器和无源电子标签。描述了 4 种类型的标签协议，即 Type A、Type B、Type C 和 Type D。

Type A、Type B 和 Type C 都是基于“阅读器先说话”的通信机制，这意味着无源电子标签只有在

接收阅读器的指示后才能用信息信号调节其天线的反射系数。Type A 在阅读器到无源电子标签（前向链路）的通信中使用具有唯一性解码的脉冲间隔编码（PIE, pulse interval encoding）。在该标准的规定中，由阅读器发往无源电子标签的数据帧由帧开始（SOF, start of frame）信号、帧结束（EOF, end of frame）信号、数据“0”“1”组成，时间“Tari”为指定两个连续脉冲的下降沿之间的时间宽度，Type A 中的 PIE 方式如图 3 所示。PIE 原理是通过定义脉冲下降沿之间的不同时间宽度表示数据。对于随机的信息，PIE 方式确保无源电子标签能接收到足够的能量。前向链路编码要求解码代价较低，使无源电子标签芯片能够低功耗解码。Type A 使用自适应 ALOHA 算法作为冲突仲裁算法，无源电子标签到阅读器（反向链路）的通信采用 FM0 编码。其工作原理是在每个符号周期内采用电平变化来表示逻辑。如果在每个符号时间周期开始时进行相位反转，则表示二进制“1”。如果除了在周期开始处反转之外还在符号周期的中间有一个相位反转，则表示二进制“0”。为了提高吞吐量，Gregory 等<sup>[26]</sup>提出了平衡分组码（BBC, balanced block code），实验可以得出，与 FM0 编码方案相比，速率 4/6 和 6/8BBC 表现出较高的吞吐量。

参数	Type A	Type B	Type C	Type D
前向链路编码	PIE	Manchester	PIE	—
反向链路编码	FM0	FM0	FM0/Miller	PPE/Miller (M=2)

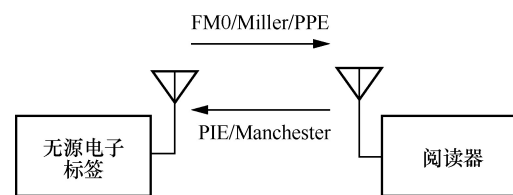


图 2 无源反向散射 RFID 系统模型

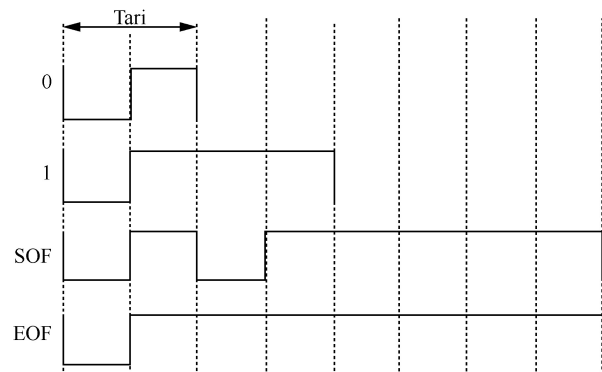


图 3 Type A 中的 PIE 方式

Type B 在前向链路中使用曼彻斯特 (Manchester) 编码。在曼彻斯特编码中, 每一个符号周期中间都有一电平变化 (上升或下降), 中间的跳变既作为同步时钟信号, 也作为数据信号。编码示例如图 4 所示, 在此规定符号周期中间的负跳变表示二进制“1”, 正跳变则表示二进制“0”。国际标准 ISO14443 Type A 中电子标签向阅读器传递数据时采用曼彻斯特编码。使用自适应二叉树碰撞作为仲裁算法, 反向链路同样采用 FM0 编码。反向不归零 (NRZ, non-return to zero) 编码用高电平表示二进制“1”, 低电平表示二进制“0”; 与之相对应的归零 (RZ, return to zero) 编码的特性就是每个周期内的数据位脉冲结束后, 均需要维持一段时间的低电平。国际标准 ISO14443 Type B 中电子标签和阅读器传递数据时均采用 NRZ 编码。

Type C 使用 PIE 作为前向链路编码方式, 随机时隙碰撞作为仲裁算法, 反向链路采用 FM0 编码或密勒 (Miller) 编码。Miller 编码使用符号周期的中间跳变对二进制“1”进行编码, 中间不跳变对二进制“0”进行编码。若出现连续的“0”位, 会在符号时间周期开始处增加一个跳变, 这样可以确保至少在两个符号时间周期之后有一个逻辑电平的变化。图 4 为  $M=2$  (1 个符号周期对应 2 个子载波周期) Miller 编码的子载波以及编码示例。

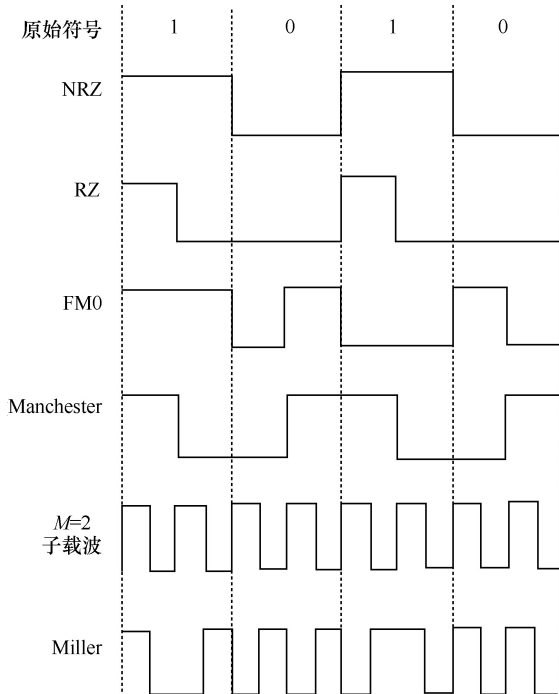
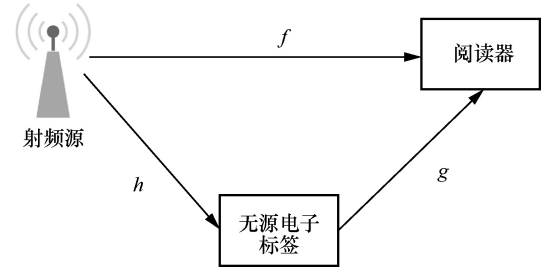


图4 编码示例

Type D 是基于“标签先说话”的通信机制, 同时是一种增强的只听标签谈话 (TTO, tag talk only) 技术。故不定义专用的前向链路, 在反向链路中使用脉冲位置编码 (PPE, pulse position encoding) 或密勒编码。

### 3 无源反向散射通信系统模型

无源反向散射通信系统模型如图 5 所示<sup>[27]</sup>, 该系统由射频源、无源电子标签和阅读器组成,  $h$ 、 $f$ 、 $g$  分别为射频源与无源电子标签、射频源与阅读器、无源电子标签与阅读器之间的信道增益。其中, 射频源发送的信号可为无源电子标签提供自身工作所需的能量, 并作为无源电子标签反射信号的载体。无源电子标签从射频源发送的载波信号中采集到足够的能量并被激活后, 通过调节前端电路的反射系数将自身待发送数据调制到载波上。阅读器同时接收到由射频源传输的载频信号和由无源电子标签反射的反向散射信号, 对接收的信息进行解调并解码还原出无源电子标签反射的有效数据, 从而实现了无源电子标签和阅读器间的信息传递。相比于 RFID 系统, 由于载波信号不需要经历往返两次路径衰落而且射频源距离无源电子标签较近, 大大减少了路径损耗, 从而可有效增大阅读器与无源电子标签的通信距离。

图5 无源反向散射通信系统模型<sup>[27]</sup>

射频源发射的载波信号可表示为

$$c(n) = \sqrt{2P}e^{j(2\pi f_c n + \varphi_c)} \quad (1)$$

其中,  $P$  为发射功率,  $f_c$  表示载波信号的频率,  $\varphi_c$  表示发射载波的初始相位。

无源电子标签通过信道  $h$  收到射频源发送的载波信号, 其接收信号可表示为

$$r(n) = h\sqrt{2P}e^{j(2\pi f_c n + \varphi_c)} + w_1(n) \quad (2)$$

其中,  $w_1(n)$  表示 AWGN, 由于无源电子标签电路仅由无源元件组成, 则  $w_1(n)$  通常忽略不计<sup>[1]</sup>。

由于没有电池, 在调制和进行反向散射之前,

无源电子标签将首先从接收信号  $r(n)$  中获取能量。当被激活后，无源电子标签通过改变自身负载阻抗的方式将自身信号调制到接收信号  $r(n)$  上，然后将调制后的信号反向散射到阅读器。其中，无源电子标签产生的反向散射信号可表示为

$$x_i(n) = \Gamma_n h \sqrt{2P_e} e^{j(2\pi f_c n + \varphi_c)} b(n) \quad (3)$$

其中， $b(n) \in \{0,1\}$  表示无源电子标签数据， $\Gamma_n \in \{\Gamma_0, \Gamma_1\}$  表示无源电子标签处于反射状态和吸收状态下的复反射系数。当无源电子标签处于反射状态时， $\Gamma_n = \Gamma_1$ ；当无源电子标签处于吸收状态时， $\Gamma_n = \Gamma_0$ 。

载波信号和无源电子标签反射信号到达阅读器的时延可以忽略不计<sup>[28]</sup>，阅读器接收信号可表示为两路信号的叠加

$$\tilde{y}(n) = fc(n) + gx_i(n) + \tilde{w}(n) \quad (4)$$

其中， $\tilde{w}(n)$  表示 AWGN 信号。阅读器的主要任务就是从接收信号  $\tilde{y}(n)$  中提取出无源电子标签数据  $b(n)$ 。将收到的带通信号  $\tilde{y}(n)$  通过载波频率为  $f_r$  且载波相位为  $\varphi_r$  的信号解调处理后，得到解调后的信号如下

$$y(n) = \tilde{y}(n) e^{-j(2\pi f_r n + \varphi_r)} \quad (5)$$

$$= \sqrt{2P} (f + \Gamma_n h g b(n)) e^{-j(2\pi \Delta f n + \Delta \varphi)} + w(n) \quad (6)$$

其中， $\Delta f = f_r - f_c$  为射频源与阅读器之间的载波频率偏移 (CFO, carrier frequency offset)， $\Delta \varphi = \varphi_r - \varphi_c$  为射频源与阅读器之间的载波相位偏移 (CPO, carrier phase offset)， $w(n)$  为处理后的噪声。

CFO 及 CPO 的存在将使阅读器的译码性能下降。假设阅读器与射频源共用同一个振荡器，在单稳态情况下假设  $\Delta f = \Delta \varphi = 0$ ，并进一步假设阅读器通过信道估计方法估计出射频源与阅读器之间的信道增益  $\hat{f}$  并定义信道估计误差  $e = f - \hat{f}$ ，故得到

$$y(n) = \sqrt{2P} e + h_i b(n) + w(n) \quad (7)$$

$$= h_i b(n) + w_i(n) \quad (8)$$

其中， $h_i = \Gamma_n \sqrt{2P} h g$ ， $w_i(n) = w(n) + \sqrt{2P} e$ 。

#### 4 基于无源反向散射的反向链路编译码方案

由于无线信道的开放性，信道极易受干扰、多径衰落和噪声等非理想性因素的影响，信号在传输过程中发生畸变和失真导致误码。在无源反向散射通信系统中，受能耗及硬件资源的限制，无源电子

标签应采用低功耗、低复杂度、易实现的编码方式。基于无源传感器节点资源受限的前提，本文选择曼彻斯特编码、FM0 编码、Miller 编码 3 种方式进行阐述并在无源反向散射模型中进行实验仿真。

曼彻斯特编码也被称为分相编码，曼彻斯特编码符号映射见表 3。对于数据“1”，码元中心处电平向下跳变；对于数据“0”，码元中心处电平向上跳变。由于无源电子标签产生的发送数据一般是“0”“1”数据不等概的，而在许多信号处理方法是基于数据等概的假设，应用在实际情景中会存在一定的偏差。曼彻斯特编码将码元分为两个相等的间隔，且在每一个码元的符号周期中间都有一电平跳变，此电平变化解决了无源电子标签待发送不等概的问题<sup>[29]</sup>。对于阅读器来说，不仅可以在码流中提取到时钟信息，而且当多个无源电子标签同时发送相反的符号时，会出现信号在符号周期内没有电平变化的情况，这有利于发现数据传输的错误并进行碰撞检测。

表 3 曼彻斯特编码符号映射

数据位	编码结果
“0”	$x_0 = [-1, +1]$
“1”	$x_1 = [+1, -1]$

Miller 编码是曼彻斯特编码的一种变形。其码型特点是：对于数据“1”，码元起始不跳变，中心处跳变；对于数据流中的单个数据“0”，在码元起始及中心处均不发生电平跳变，而数据流中的连“0”串，则在“0”码元的边界处出现电平跳变，以便于阅读器重建位节拍。如图 4 中 Miller 编码示例。

FM0 编码要求每一个码元的起始都发生电平跳变。如果在码元中心处还存在电平跳变，则表示数据“0”；中间无跳变，则表示数据“1”。

假设标签产生的数据  $b(n)$  长度为  $N$ ，编码之后发送序列为  $x(n)$ ，对于接收端收到的  $y(n) = h_i x(n) + w_i(n)$  经处理后得到

$$r := \Re \left\{ \left( \frac{h_i}{|h_i|} \right)^* y(n) \right\} = |h_i| x(n) + w(n) \quad (9)$$

对于曼彻斯特编码和 Miller 编码，根据式(8)采用最大后验判决准则。以曼彻斯特编码为例，首先译码出码元为

$$\hat{x}_n = x_0, \quad \Pr(x_n = x_0 | r_n) \geq \Pr(x_n = x_1 | r_n) \quad (10)$$

在等概条件下，最大后验概率准则等价于最大似然准则，即

$$\hat{x}_n = x_0, \Pr(r_n | x_n = x_0) \geq \Pr(r_n | x_n = x_1) \quad (11)$$

进一步可得

$$\begin{cases} \hat{x}_n = x_0, & \|r_n - |h|x_0\|^2 \leq \|r_n - |h|x_1\|^2 \\ \hat{x}_n = x_1, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $x_0 = [-1, 1]$ ,  $x_1 = [1, -1]$ ,  $r_n = [r(2n-1), r(2n)]$ ,  $n = 1, \dots, N$ 。根据表 3 中的编码符号映射, 当  $\hat{x}_n = x_0$  时, 对应发送的无源电子标签数据  $b(n) = 0$ ; 当  $\hat{x}_n = x_1$  时, 对应发送的无源电子标签数据  $b(n) = 1$ 。

对于 FM0 编码, 存在单符号译码与跨符号译码两种译码方式。单符号译码机制只考虑当前符号周期之内的数据, 根据在符号周期内有无跳变的特性译码出原始码字, 即无跳变译码为“1”, 有跳变译码为“0”。跨符号译码方式考虑 FM0 编码在起始电平一定跳变的特性, 将相邻两个时刻中, 前一时刻的后半部分码元与后一时刻的前半部分码元作为新码元, 从而将 4 种码元波形简化为两种码元波形  $s_0 = [+1, -1]$ 、 $s_1 = [-1, +1]$ , FM0 编码示例如图 6 所示。

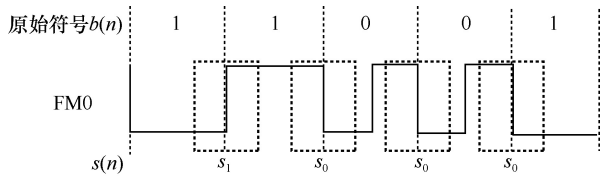


图 6 FM0 编码示例

对于第一个无源电子标签数据  $b(1)$  和最后一个无源电子标签数据  $b(N)$ , 采用单符号译码方式得到; 对于其他数据, 首先根据最大后验概率判决准则重建序列  $s_n = \{s_0, s_1\}$ , 而后应用异或操作译码无源电子标签数据  $b(n)$ , 表示为

$$b(n) = s_{n-1} \oplus s_n \quad (13)$$

其中,  $n = 2, \dots, N-1$ 。若跳变情况相同, 则结果为“0”, 说明符号周期之内发生了跳变, 与其编码规则相符。

### 5 实验结果与分析

考虑无源电子标签发送数据长度  $N = 10^4$ 、载波信号功率  $P = 1 \text{ W}$  的信道  $h_1 \sim \text{CN}(0, 1)$ 。Miller 编码中子载波周期  $M = 2$ 。

假设射频源与阅读器之间的信道增益估计结果  $\hat{f}$  准确。当无源电子标签应用各编码方式时, 不同信噪比下, 各编码方式信噪比性能对比如图 7 所示。可以发现, 随着通信系统信噪比的增大, 各编码方式对应的误码率下降。对于 FM0 编码, 跨符

号译码性能相比单符号译码性能提升约 3 dB, 其主要原因是在跨符号译码方式中, 不仅利用了 FM0 编码在波形周期内有无跳变的特性, 还利用了 FM0 编码在起始电平一定跳变的特性, 使不同的码元波形数量由 4 减小到 2, 从而译码时码元种类数减小了一半。在不同信噪比下, 曼彻斯特编码性能最优。

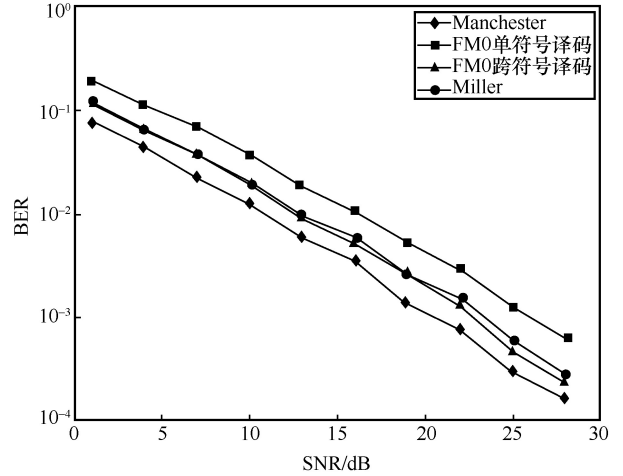


图 7 不同信噪比下, 各编码方式信噪比性能对比

当信道估计结果  $\hat{f}$  存在偏差, 即  $e = f - \hat{f} \neq 0$  时, 假设估计误差服从均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的高斯分布, 即  $e \sim N(0, \sigma^2)$ , 设置信噪比  $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$ 。当无源电子标签应用各编码方式时, 不同信道估计误差下, 各编码方式信噪比性能对比如图 8 所示。可以发现, 随着信道估计误差的增大, 误码率均上升。因此, 在通信系统中, 设计更优的信道估计算法对于提升通信系统性能也有重要意义。在不同的估计误差下, FM0 编码跨符号译码性能仍然优于 FM0 编码单符号译码性能, 曼彻斯特编码性能仍然最优。

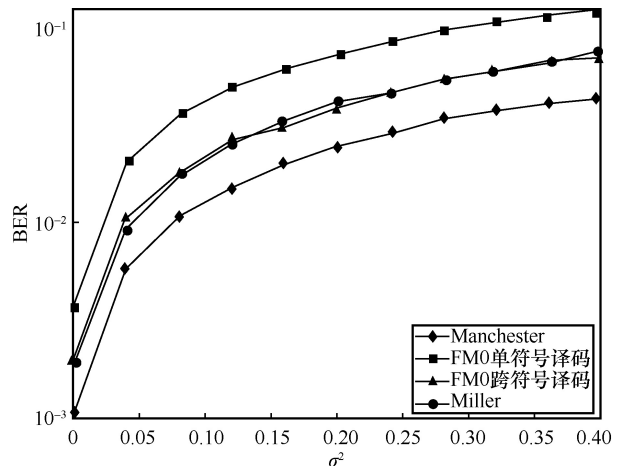


图 8 不同信道估计误差下, 各编码方式信噪比性能对比

## 6 结束语

无源物联网是新兴的物联网概念,通过无源反向散射通信技术让传感器摆脱电池的束缚,降低无源传感器的成本,从而实现绿色通信。由于无源传感器节点资源受限,如何利用编码技术提高系统可靠性能是本文的出发点。

本文首先对传统信道编码的发展进程进行阐述并梳理。其次,根据国际标准 ISO18000-6 概述列举了射频信号在 860~960 MHz 频率范围内的 RFID 系统编解码方案,并分析了各编码方式的优缺点。在建立了无源反向散射通信系统模型后,考虑无源传感器节点资源受限,应采用低功耗、低复杂度、易实现的编码方式,本文应用曼彻斯特编码、FM0 编码、Miller 编码 3 种方式作为无源传感器编解码方案并验证、分析其性能。

在有无信道估计误差下,实验结果均显示曼彻斯特编码相较于其他两种方式性能更佳;说明其具有较强的纠错性质和适应性。

### 参考文献:

- [1] WANG G, GAO F, FAN R, et al. Ambient backscatter communication systems: detection and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(11):4836-4846.
- [2] YAO C, LIU Y, WEI X, et al. Backscatter technologies and the future of internet of things: challenges and opportunities[J]. *Intelligent and Converged Networks*, 2020, 1(2): 170-180.
- [3] CUI Z, WANG G, WEI X, et al. Future applications and technical challenges of backscatter communication[J]. *Mobile Communication*, 2021, 45(4): 29-36.
- [4] ALEVIZOS P N, FASARAKIS-HILLIARD N, TOUNTAS K, et al. Channel coding for increased range bistatic backscatter radio: experimental results[C]//*Proceedings of 2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 38-43.
- [5] OROUTZOGLOU M, VOUGIOUKAS G, KARYSTINOS G N, et al. Multistatic noncoherent linear complexity miller sequence detection for Gen2 RFID/IoT[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(12): 8067-8080.
- [6] LIU W J, SHEN S P, TSANG D H K, et al. Enhancing ambient backscatter communication utilizing coherent and non-coherent space-time codes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(10): 6884-6897.
- [7] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [8] HAMMING R W. Error detecting and error correcting codes[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1950, 29(2): 147-160.
- [9] MULLER D E. Application of Boolean algebra to switching circuit design and to error detection[J]. *Transactions of the IRE Professional Group on Electronic Computers*, 1954, EC-3(3): 6-12.
- [10] BOSE R C, RAY-CHAUDHURI D K. On a class of error correcting binary group codes[J]. *Information and Control*, 1960, 3(1): 68-79.
- [11] HOCQUENGHEM A. Codes correcteurs d'erreurs[J]. *Chiffres*, 1959, 2(2): 147-156.
- [12] REED I S, SOLOMON G. Polynomial codes over certain finite fields[J]. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1960, 8(2): 300-304.
- [13] GOPPA V D. A new class of linear error correcting codes[J]. *Problemy Peredachi Informatsii*, 1970, 6(3): 24-30.
- [14] ELIAS P. Coding for noisy channels[J]. *Ire Convention Record*, 1955(4): 37-46.
- [15] VITERBI A. Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm[J]. 1967, 13(2): 260-269.
- [16] UNGERBOECK G. Channel coding with multilevel/phase signals[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1982, 28(1): 55-67.
- [17] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: turbo-codes. 1[C]//*Proceedings of ICC '93 - IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2002: 1064-1070.
- [18] BAHL L, COCKE J, JELINEK F, et al. Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate (Corresp.)[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1974, 20(2): 284-287.
- [19] HAGENAUER J, OFFER E, PAPKE L. Iterative decoding of binary block and convolutional codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1996, 42(2): 429-445.
- [20] MACKAY D J C, NEAL R M. Near Shannon limit performance of low density parity check codes[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(6): 457.
- [21] MACKAY D J C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices[C]//*Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory*. Piscataway: IEEE Press, 2002: 113.
- [22] GALLAGER R. Low-density parity-check codes[J]. *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, 8(1): 21-28.
- [23] CHUNG S Y, FORNEY G D, RICHARDSON T J, et al. On the design of low-density parity-check codes within 0.004 5 dB of the Shannon limit[J]. *IEEE Communications Letters*, 2001, 5(2): 58-60.
- [24] ARIKAN E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [25] ISO. Information technology - Radio frequency identification for item management - Part 6: parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz General: ISO/IEC 18000-6: 2013[S]. 2013.
- [26] DURGIN G D, DEGNAN B P. Improved channel coding for next-generation RFID[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2017, 1(1): 68-74.
- [27] KIMIONIS J, BLETSAS A, SAHALOS J N. Increased range bistatic scatter radio[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(3): 1091-1104.

[28] LIU V, PARKS A N, TALLA V, et al. Ambient backscatter: wireless communication out of thin air[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 39-50.

[29] TAO Q, ZHONG C, ZHANG C. Environmental backscatter communication technology for passive Internet of things[J]. Journal of Internet of Things, 2019, 3(2): 28-34.

#### [作者简介]



杨义冰（2000-），女，北京交通大学计算机与信息技术学院博士生，主要研究方向为无线信号处理与移动互联网。



陈霞（1975-），女，博士，北京交通大学电子信息工程学院副教授，主要研究方向为轨道交通无线移动通信系统。



王公仆（1980-），男，博士，北京交通大学计算机与信息技术学院教授，主要研究方向为无线信号处理与移动互联网。



许荣涛（1975-），男，博士，北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室副教授，主要研究方向为反向散射通信、5G/6G 物理层关键技术。



艾渤（1974-），男，博士，北京交通大学电子信息工程学院院长、教授，主要研究方向为移动通信。