

无线数据与能量协同传输中的游程限制编码设计

Run-Length-Limited Coding Design for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

胡杰/HUJie LI¹
李梦媛/LI Mengyuan¹
杨鲲/YANG Kun^{1,2}

(1. 电子科技大学, 四川 成都, 611731;
2. 埃塞克斯大学, 英国 克切斯特,
CO43SQ)

(1. University of Electronic Science and
Technology of China, Chengdu 611731,
China;

2. University of Essex, Colchester CO4
3SQ, United Kingdom)

在即将到来的物联网时代, 无线通信网络需要满足未来大规模部署的低功耗机器类通信设备需求。由于其远场传输特性(≥ 2 m), 基于无线射频信号的无线能量传输技术(WPT)可以用于实现对低功耗通信设备的远程充电, 以提升该类设备的使用寿命。但无线射频能量传输必然会与同样工作在射频频段的数据通信竞争有限的无线空口资源。如何利用有限的无线空口资源满足用户的数据通信和充电需求值得人们进行一系列深入研究。由此衍生出了广受关注的热门技术——无线数能同传(SWIPT)^[1]。

然而当前对于SWIPT的研究只局限在物理层收发机设计^[2]、接入控

收稿日期: 2018-07-15

网络出版日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61601097, U1705263, 61620106011)、中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2016Z011)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0018-006

摘要: 从信息论角度出发, 在离散对称信道下, 研究了游程限制(RLL)编码的无线数据与能量协同传输(简称为无线数能同传)(SWIPT)性能: 在满足每比特的最低携能要求下, 通过优化游程限制编码的码字发出概率, 最大化信源和信宿之间的平均互信息量。数值结果揭示无线数据与无线能量传输(WPT)之间的权衡关系, 并提供游程限制编码在不同信道条件下的无线数能传输性能。

关键词: 射频 WPT; SWIPT; RLL; 离散对称信道

Abstract: From the information theoretical aspect, the simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) performance of the run-length-limited (RLL) code is studied. The mutual information between the information source and destination is maximised by optimising the transmit probability of the codewords generated by the RLL encoder, which is subject to the minimum requirement of the energy per bit delivered to the receiver. Numerical results reveal the inherent tradeoff between the wireless information transfer and wireless power transfer (WPT) performance of the RLL code, while characterising its SWIPT performance in different channel conditions.

Keywords: radio frequency-based WPT; SWIPT; RLL; symmetric channel

制层资源分配^[3]和协议设计^[4-5], 以及数能基站部署^[6], 缺乏从信息论角度对SWIPT本质地挖掘。Varshney在文献[7]中首次研究了在不同信道条件下, 信源与信宿之间的最大互信息量和能量接收要求之间的权衡。他们的工作证明: 调整编码器产生的码字结构可以影响SWIPT的性能, 这奠定了从编码角度实现数能传输控制的理论基础。在此基础上, Tandon等研究者在文献[8]中对码字结构进行优化, 在满足接收机的实时能量需求的同时可以最大化对称信道的平均互信息量。

在文献[7]和[8]中, 作者均是对信源发出的二进制比特的发送概率进行优化以实现最优的数能传输性能, 却忽略了具体的编码方案。通常情况下, 传统的信源编码器产生等概率的二进制比特, 从而最大化码字的信息传输能力。但是单一的码字结构极大地制约了码字的能量传输能力, 并不能满足接收机多样化的能量需求。如下的编码器可以实现对码字结构的灵活调整^[9]:

(1) 补偿性能量编码。不携带任何信息的伪比特可以直接链接在信息比特之后, 使得生成的码字具备能

满足某一具体能量需求的结构。这种编码器的编解码方案具备最低的复杂度;但不携带任何信息的伪比特只起到能量补充的作用,会显著降低信息传输的有效性。

(2)逆信源编码。典型的信源编码器将不等概率发送的原始信源消息编成0/1比特等概率出现的二进制比特序列。

相反,逆信源编码可将等概率发出的原始信源消息编成0/1比特非等概率出现的二进制比特序列,从而满足序列的无线能量传输需求。但是需要考虑到编码器和解码器之间的异步情形极大地影响接收端解码的有效性。

(3)约束编码。一些约束编码技术具备改变码字结构的自由度,可以实现对无线能量传输的灵活控制。由于该种编码技术并不引入不携带信息的伪比特,因此其信息传输的有效性并不会受到影响。另外,高效的符号级别网格算法可以用于约束编码的解码过程,使得其可以在数能编码领域进行广泛应用。典型的约束编码技术包括游程限制编码以及一元编码。

游程限制编码是一种典型的约束编码。Fouladgar等研究者在文献[10]中研究了游程限制编码作为能量载体对电池充能状态的影响;但这篇文献并没有从信息论角度研究每比特携带能量和每比特携带信息之间的制约关系。

与上述已有研究不同,本文的创新点主要在如下方面:

(1)提出了一种实际的基于游程限制编码的SWIPT收发机结构,在对称信道下,从信息论角度对其数能传输性能进行分析;

(2)发现游程限制编码的最优码字发送概率,在满足接收机能量获取需求的前提下,最大化对称信道的平均互信息量;

(3)数值结果解释了游程限制编码的可达信息传输速率以及能量传

输能力之间的权衡关系。

1 SWIPT 系统模型

图1描述了单用户SWIPT系统的完整收发机结构。其中数能发射机包含以下模块:

(1)信源。信源可以产生接收机请求的原始消息,也可以看作是传统的信源编码器和前向纠错编码器的混合体。

(2)数能编码器。数能编码器可将信源产生的原始消息进行进一步处理,产生二进制比特序列,从而满足接收机的通信和充能请求。该系统采用游程限制编码作为数能编码器。游程的定义为在一个比特序列中某一个符号连续出现的长度。在通常情况下,游程限制编码分为0型和1型。一个0型(d,k)游程限制编码对于生成码字具备如下约束条件:首先,在2个连续比特1之间,比特0的游程长度至少为 d ;其次,在2个连续比特1之间,比特0的游程长度最多为 k 。一个1型(d,k)游程限制编码对于比特1的游程长度也相应限制在 d 和 k 之间。控制不同游程长度出现的概率即可实现对码字结构的调整。

(3)数字调制器。数字调制器可将二进制比特序列调制到载波信号的幅度和相位上。通过幅度调制的方式,不同组合的二进制比特产生的调制符号会携带不同的能量。因此在调制方式给定的情况下,调整数能编码器产生的码字结构会影响WPT的性能,但需要对码字结构和调制方案进行联合设计^[11]。为了将设计重点放在码字结构上,在本文研究的系统中采用了启闭键控调制。因此比特1可调制为射频信号 $A\sin 2\pi ft$,其

中 A 和 f 分别为射频信号的幅度和频率。该信号携带的能量则可以定义为1个基本能量单元。在比特0的符号周期内,发射机不会发射任何射频信号,因此可以认为比特0携带的能量为0。

如图1所示,为了实现数据与能量的接收,接收机采用了如下模块:

(1)数字解调器,可将射频信号携带的基带符号进行解调。针对启闭键控调制,接收机采用能量检测的解调方式。如果接收功率低于检测门限,则解调器将当前符号判断为比特0;若接收功率高于检测门限,则解调器将当前符号判断为比特1。

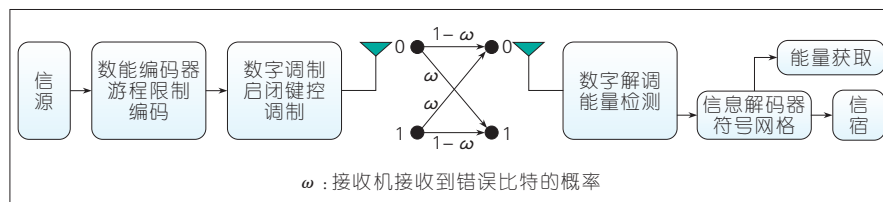
(2)信息解码器,将接收到的码字进行解码以恢复原始信息。通常情况下对于游程限制编码可采用符号级别的网格算法进行解码^[12]。该算法可以避免出现解码错误扩散。

(3)信宿,最终接收到解码后的信息,可以进行信道和信源解码。

(4)理想数能接收机架构,即数字解调器通过“观察”的方式完成解调工作。进入数字解调器的射频信号能量不会产生任何损失,还可以完全用于能量获取。

发射机和接收机之间的无线信道对射频信号传输带来的损耗影响可以用图1中的对称信道来表示:

(1)当比特0进行传输时,发射机在当前符号周期内不发射任何射频信号。接收机天线只能接收到随机的噪声和干扰信号。若当前的随机噪声和干扰信号的总功率低于能量检测门限,则比特0可以被接收机成功恢复,概率为 $(1-\omega)$ 。由于此时噪声和干扰信号的总功率过低,不足以激活能量获取电路,因此接收机不



▲图1 无线数能同传系统

能获得任何能量^[1]。若当前的随机噪声和干扰信号的功率高于能量检测门限,则接收端判决的接收比特符号为1,概率为 ω 。这种情况下,噪声和干扰功率可以激活能量获取电路,使得接收机能够成功获取1个单位的射频能量。

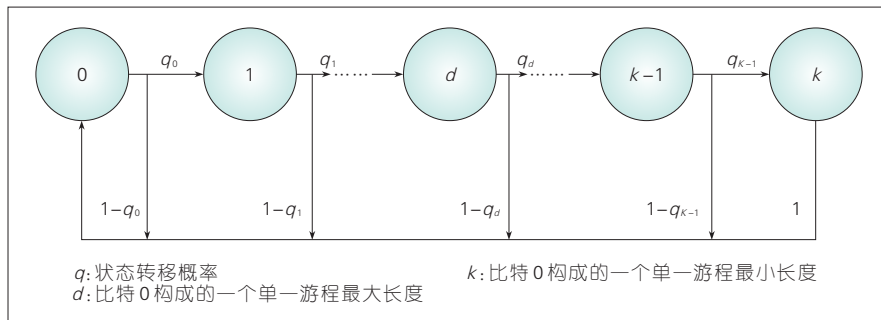
(2)当比特1进行传输时,发射机在当前符号周期发射正弦载波信号。接收机接收到的信号是经过信道衰减的有用信号和噪声干扰的叠加信号。若总信号功率高于能量检测门限,则比特1可以被接收机成功恢复,概率为 $(1-\omega)$ 。此时叠加信号总功率足以激活能量获取电路,接收机可以获得1个单位的射频能量。若随机噪声和干扰信号的功率较弱,且有用信号经过信道大幅度衰减,造成接收信号功率低于能量检测门限,则接收端判决的接受比特符号为0,概率为 ω 。这种情况下,叠加信号接收到的能量不能激活能量获取结果,接收机不能获得任何能量。

2 游程限制编码的数能传输性能

本节以0型游程限制编码为例对其数能传输性能进行分析。0型编码和1型编码在数据传输性能上完全一致,但在能量传输性能上则存在着差异。

2.1 游程限制编码的状态机

图2给出了0型 (d,k) 游程限制编码的状态机结构,其中的每一个状态描述的是对应的比特0构成的一个



▲图2 0型 (d,k) 游程限制编码的状态机

游程的长度。当状态机处于状态 $j(j \geq d)$ 时,当前比特0构成的游程长度为 j ,此时若信源发出一个比特0,则状态机从状态 j 转移到状态 $(j+1)$,转移概率为 q_j ,这个概率也是当前状态下信源发出比特0的概率。若此时信源发出比特1,则当前游程结束,状态机从状态 j 转移到状态0,转移概率为 $(1-q_j)$,这个概率也是当前状态下信源发出比特1的概率。比特0构成的一个单一游程的最大长度为 k ,所以当状态机处于状态 k 时,信源以 $q_k=0$ 的概率发射比特0,以1的概率发射比特1,结束当前游程。由于在0型 (d,k) 游程限制编码中,游程的最短长度为 d ,因此当状态机处于状态 $j(j < d)$ 时,信源会以概率 $q_j=1$ 发射比特0,继续增加当前游程的长度。为了满足游程限制,此时信源发射比特1的概率为 $1-q_j=0$ 。该游程编码的状态转移概率可以表示为式(1)中 $(k+1) \times (k+1)$ 矩阵 Q :

$$Q = \begin{bmatrix} 1-q_0 & q_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1-q_1 & q_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1-q_{k-1} & 0 & 0 & \cdots & q_{k-1} \\ 1-q_k & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

状态机的稳态概率分布可以表示为行向量 $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k\}$,该稳态概率分布可以通过求解下述线性方程组获得:

$$\begin{cases} \pi \times Q = \pi \\ \pi \times I_{(k+1)} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $I_{(k+1)}$ 表示 $(k+1) \times 1$ 的全1列向量。稳态概率分布 π 和状态转移概

率矩阵 Q 均将用于计算游程限制编码的数能传输性能。

2.2 对称信道下的数据传输性能

假设信源发出长度为 N 的比特序列 $X_N = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 。在这个序列中各个比特符号之间的相关性需要满足上述0型 (d,k) 游程限制编码状态机的状态转移特性,因此该序列中的比特符号可以映射为相应的状态机状态序列 $S_N = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ 。比如当信源产生长度为7的比特序列 $X_7 = \{1, 0, 0, 1, 0, 0, 0\}$ 时,对应的状态序列为 $S_7 = \{0, 1, 2, 0, 1, 2, 3\}$ 。信源(发射机)可用符号 x 表示,信宿(接收机)可用符号 y 表示。当信源 x 发出 N 比特序列 $X_N = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 时,信宿 y 接收到的比特序列为 $Y_N = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_N\}$ 。那么信源和信宿之间的平均互信息量可表示为:

$$I(x; y) = H(x) - H(x|y) \quad (3)$$

其中信源熵 $H(x)$ 可进一步表示为:

$$H(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{H(X_N)}{N} = H(S_2|S_1) \quad (4)$$

由于篇幅限制,省略了上述公式的详细推导过程,但在其中运用了状态机的马尔可夫特性以及信源极限熵的特性^[13]。另外公式(3)中的条件熵 $H(x|y)$ 可进一步表示为:

$$\begin{aligned} H(x|y) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{H(X_N)}{N} \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{H(S_N|Y_N)}{N} \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \left[H(S_1|Y_1, \dots, Y_N) + \sum_{i=2}^N H(S_i|S_1, \dots, S_{i-1}, Y_1, \dots, Y_N) \right] \quad (5) \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{H(S_1|Y_1, \dots, Y_N) + (N-1)H(S_2|S_1, Y_1, Y_2)}{N} \\ &= H(S_2|S_1, Y_1, Y_2) \end{aligned}$$

将信源熵 $H(x)$ 的表达式(4)和条件熵 $H(x|y)$ 的表达式(5)带入式(3)中可以得到,经过错误概率为 ω 的对称信道传输后,信源与信宿之间的平均互信息量 $I(x; y)$:

$$\begin{aligned} I(x; y) &= H(S_2|S_1) - H(S_2|S_1, Y_1, Y_2) = \\ &= H(Y_1, Y_2|S_1) - H(Y_1, Y_2|S_2, S_1) = \\ &= \sum_{i=d}^{k-1} \pi_i \{ H[(1-q_i)(1-2\omega) + \omega] - H(\omega) \} \quad (6) \end{aligned}$$

其中对于所有的 $0 < x < 1$ 有 $H(x) = -\log_2 x - \log_2(1-x)$ 。公式(6)的推导过程中利用了马尔可夫信源熵的标准推导方法^[13]。平均互信息量 $I(x; y)$ 是关于状态转移概率矩阵 Q 的函数。另外 1 型 (d, k) 游程限制编码在错误概率为 ω 的对称信道中传输, 所能达到的平均互信息量也用公式(6)表达。

2.3 对称信道下的能量传输性能

根据第 2 节中对对称信道模型的描述, 只有当接收机接收到比特 1 时, 才能获得 1 个单位的能量。当接收机接收到比特 0 时, 不能采集到任何能量。因此接收机能够获取能量的多少取决于 2 个事件: (1) 游程限制编码器发出的码字结构, 即码字中携能比特 1 所占比例; (2) 对称信道对于码字传输的影响, 如比特 1 携带的能量有可能损失, 而本不携带能量的比特 0 由于突发噪声和干扰的影响也可以使得接收端获取额外 1 个单位的能量。游程限制编码的能量传输性能可以用接收机接收到携能比特 1 的概率来表示, 这个概率也可以定义为码字中平均每比特携带的能量。

当图 2 所示的 0 型 (d, k) 游程限制编码的状态机处于状态 j 时, 编码器有 q_j 的概率发出比特 0, 因此在给定状态转移概率矩阵 Q , 根据公式(2) 求出稳态概率分布 π 的情况下, 编码器发出比特 0 的概率为 $p_0 = \sum_{j=1}^k \pi_j q_j$ 。在对称信道的影响下, 当发射机发出的比特 0 在传输过程中被对称信道翻转, 接收机才可以获取 1 个单位的能量。因此在这种情况下, 接收机可以获得的平均每比特能量表示为 $p_0 = \sum_{j=0}^k \pi_j q_j \omega$ 。同样, 编码器发出比特 1 的概率为 $p_1 = \sum_{j=0}^k \pi_j (1 - q_j)$ 。只有当发射机发射的比特 1 在传输过程中没有发生变化时, 接收机才可以获

取 1 个单位的能量。因此在这种情况下, 接收机可以获得的平均每比特能量表示为 $\sum_{j=0}^k \pi_j (1 - q_j) (1 - \omega)$ 。综上所述, 经过比特错误概率为 ω 的对称信道传输, 0 型 (d, k) 游程限制编码所能传递的平均每比特能量为:

$$E_0(y) = \sum_{j=0}^k \pi_j [q_j \omega + (1 - q_j)(1 - \omega)], \quad (7)$$

其中 $E_0(y)$ 是关于状态转移概率矩阵 Q 的函数。同理, 经过比特错误概率为 ω 的对称信道传输, 1 型 (d, k) 游程限制编码所能传递的平均每比特能量为:

$$E_1(y) = \sum_{j=0}^k \pi_j [q_j (1 - \omega) + (1 - q_j) \omega]. \quad (8)$$

2.4 码字优化设计

当在图 1 所示的数能收发系统中采用 0 型 (或 1 型) (d, k) 游程限制编码器时, 发送码字的优化设计问题可以建模为:

目标函数: $\max I(x; y)$,

约束条件: $E_0(y) \geq E_{th}$ (或 $E_1(y) \geq E_{th}$)。 (9)

该优化问题是通过寻找最优的编码器状态转移概率矩阵 Q^* , 在保证公式(7)或(8)给出的平均每比特传递的能量 $E_0(y)$ (或 $E_1(y)$) 大于门限值 E_{th} 的前提下, 最大化由公式(6)给出的信源和信宿之间的平均互信息量 $I(x; y)$ 。

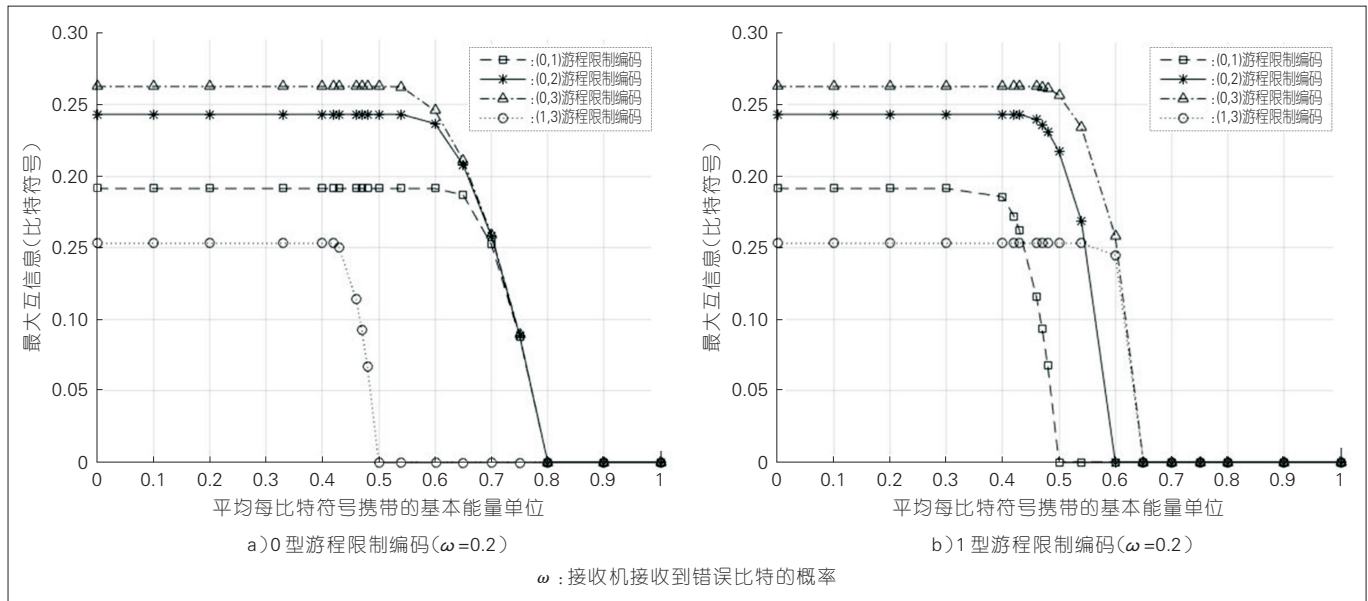
当采用的 0 型 (或 1 型) (d, k) 游程限制编码中参数 d 和 k 之间有较大差异时, 在计算 $I(x; y)$, $E_0(y)$ (或 $E_1(y)$) 的过程中需要采用数值方法完成对线性方程组(2)的求解, 已得到稳态概率分布 π 。因此码字优化问题(9)不能在多项式时间内解决。本文采用穷举法来求得最优的编码器状态转移概率矩阵 Q^* 。另外, 如果去掉优化问题(9)中的码字携能限制, 该问题退化为一个传统的平均互信息量最大化问题, 即采用游程限制编码器时的对称信道的信道容量求解

问题。可实现该信道容量的最优编码器状态转移概率矩阵则可以表示为 Q^* 。

3 数值结果

图 3 给出在不同游程限制要求下, 码字的数能传输性能, 其中 x 轴表示接收端对于平均每比特符号携带能量的最低要求, y 轴表示相对应的信源与信宿之间的平均互信息。经过对称信道传输, 接收机接收到错误比特的概率为 $\omega = 0.2$ 。如图 3 a) 和 b) 所示, 不同参数的游程限制编码具备如下共同趋势: 将可达信道容量的游程限制编码状态转移矩阵 Q^* 带入公式(7) (或(8)), 可计算得到该种编码方式的能量传输性能 $E_0^*(y)$ (或 $E_1^*(y)$)。若接收机对码字的最低携能要求 E_{th} 低于 $E_0^*(y)$ (或 $E_1^*(y)$), 则信道容量的可达性不会被破坏, 因此随着接收机对码字携能要求的提升, 信源和信宿之间的最大平均互信息量保持不变。当接收机对码字携能要求 E_{th} 高于 $E_0^*(y)$ (或 $E_1^*(y)$) 时, 可达信道容量的游程限制编码 Q^* 不能满足接收机的收能要求, 因此需要求解码字优化设计问题(9)获得符合能量传输需求的编码方式 Q^* 。由于 $Q^* \neq Q^*$, 可达信道容量的编码方式最优性被破坏, 信息传输性能, 即最大平均互信息量开始下降。以图 3 a) 中的 0 型(0, 1)游程限制编码为例, 当携能要求高于 0.53 时, 最大平均互信息量开始下降。

当游程限制编码以最大概率发射携能比特 1 时, 其能量传输性能达到最大。以 0 型(0, 1)编码、(0, 2)编码、(0, 3)编码为例, 当比特 0 的游程长度以 100% 的概率取 0 时, 编码器发出全 1 码字, 可达到最大能量传输性能。在对称信道错误概率为 $\omega = 0.2$ 的情况下, 每比特最大携能为 0.8 个能量单位。但(0, 3)编码具备更大的游程自由度, 因此其具备最佳的信息传输性能。0 型(1, 3)编码要求比特 0 的最低游程长度为 1, 因此当编码器



▲ 图3 不同游程限制编码在 $\omega=0.2$ 的对称信道中的数能传输性能

以 100% 的概率发出码字 101010... 时, 可达到最大能量传输性能 0.5。虽然 (1, 3) 编码具备与 (0, 2) 编码相同的自由度, 但 (1, 3) 编码需要更多的比特符号来携带同样的信息量, 造成 (1, 3) 编码的信息传输能力较低。

对图 3 a) 和 b) 进行横向比较, 相同参数的 1 型游程限制编码发出携带能比特 1 的概率要低于 0 型游程限制编码, 因此在图中给出的游程限制参

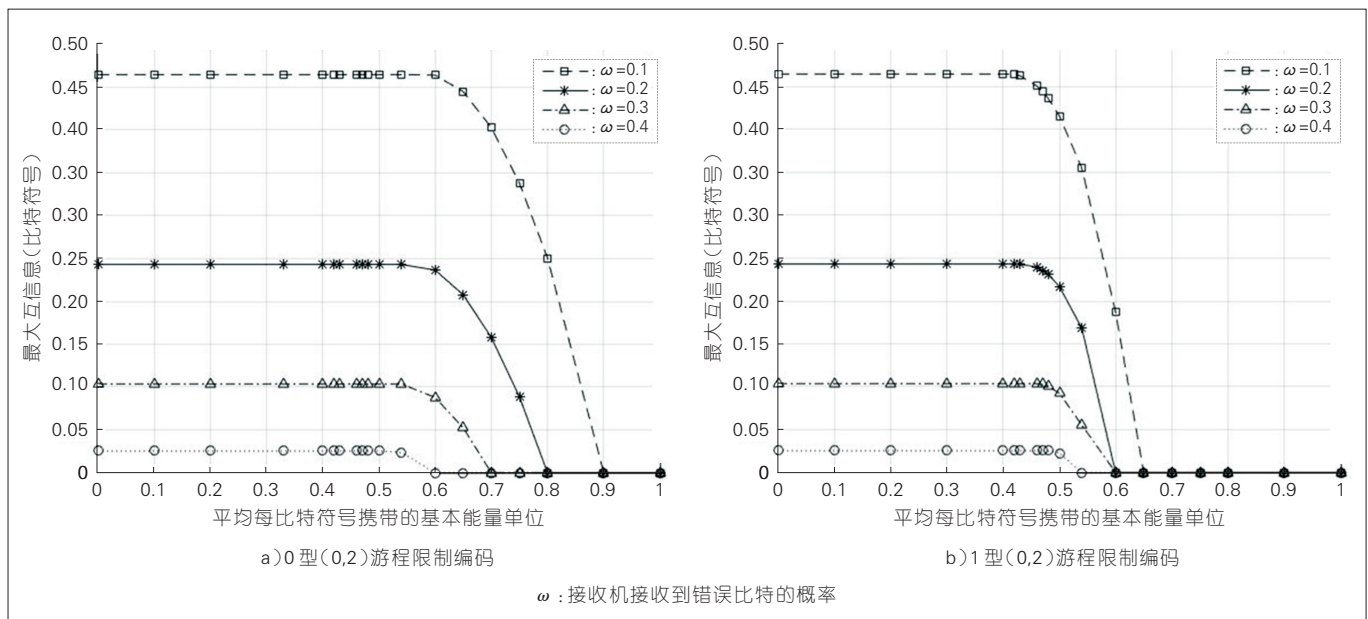
数下, 1 型编码的能量传输性能要低于 0 型编码。但是相同参数的 1 型游程限制编码具备与 0 型相同的自由度, 因此其信息传输能力与 0 型编码是一致的。

图 4 a) 和 b) 分别给出了 0 型 (0, 2) 游程限制编码和 1 型 (0, 2) 游程限制编码在比特错误概率为 $\omega = \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4\}$ 的对称信道中的数能传输性能。显然, 随着比特错误概

率的上升, 0 型 (0, 2) 游程限制编码和 1 型 (0, 2) 游程限制编码的数能传输性能都会显著下降。同样可以从图 4 a) 和 b) 中观察到: 当游程限制 (0, 2) 固定时, 0 型编码的数能传输性能要高于 1 型编码的数能传输性能。

4 结束语

在对称信道下, 我们从经典信息论出发, 研究了实际无线数能收发系



▲ 图4 0型和1型(0,2)游程限制编码在不同对称信道中的数能传输性能

统中基于游程限制编码器的数能联合编码对数能传输性能的影响。游程限制编码的最优码字设计问题建模为寻找最优的状态转移概率矩阵,在满足每比特能量传递要求的前提下,最大化采用游程限制编码后信源与信宿之间的平均互信息量的优化问题。数值结果验证了游程限制编码的数据传输和能量传输性能之间存在的权衡关系,并分析了不同信道条件下该种编码方式的数能性能。本文证明了除了时间、频率、功率、天线等无线空口资源外,码字资源在无线数能传输中也发挥了举足轻重的作用。合理分配有限的码字资源同样也可以实现无线数能传输系统的优化。

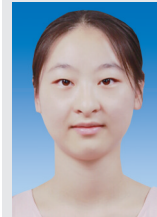
参考文献

- [1] HU J, YANG K, WEN G J, et al. Integrated Data and Energy Communication Network: A Comprehensive Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 103(1): 14–76. DOI:10.1109/comst.2018.2860778
- [2] ZHAO Y Z, HU J, DING Z G, et al. Constellation Rotation aided Modulation Design for the Multi-User SWIPT-NOMA [C]//2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). USA: IEEE, 2018: 1–6. DOI:10.1109/ICC.2018.8423037
- [3] LV K, HU J, YU Q, et al. Throughput Maximization and Fairness Assurance in Data and Energy Integrated Communication Networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 636–644. DOI:10.1109/ijot.2017.2727517
- [4] ZHAO Y Z, HU J, DIAO Y F, et al. Modelling and Performance Analysis of Wireless LAN Enabled by RF Energy Transfer[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018: 1–1. DOI:10.1109/tcomm.2018.2848974
- [5] ZHAO Y Z, HU J, GUO R, et al. Enhanced CSMA/CA Protocol Design for Integrated Data and Energy Transfer in WLANs[C]// Proceedings of IEEE Globecom 2018. USA: IEEE, 2018
- [6] ZHAO Y Z, WANG D H, HU J, et al. H-AP Deployment for Joint Wireless Information and Energy Transfer in Smart Cities[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8): 7485–7496. DOI:10.1109/tvt.2018.2821978
- [7] VARSHNEY L R. Transporting Information and Energy Simultaneously[C]//2008 IEEE International Symposium on Information Theory. USA: IEEE, 2008: 1612–1616. DOI: 10.1109/ISIT.2008.4595260
- [8] TANDON A, MOTANI M, VARSHNEY L R. Subblock-Constrained Codes for Real-Time Simultaneous Energy and Information Transfer [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(7): 4212–4227. DOI:10.1109/tit.2016.2559504
- [9] BABAR Z, MOHD IZHAR M A, NGUYEN H V, et al. Unary-Coded Dimming Control Improves ON-OFF Keying Visible Light Communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(1): 255–264. DOI: 10.1109/tcomm.2017.2759271
- [10] FOULADGAR A M, SIMEONE O, ERKIP E. Constrained Codes for Joint Energy and Information Transfer [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(6): 2121–2131. DOI:10.1109/tcomm.2014.2317480
- [11] ZONG Z Y, FENG H, ZHANG S Y, et al. Joint Transceiver Design for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in Multi-User MIMO Interference Networks [C]//2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). China: WCSP, 2014: 1–6. DOI:10.1109/WCSP.2014.6992015
- [12] ZHANG W B, SONG Z Y, BREJZA M F, et al. Learning-Aided Unary Error Correction Codes for Non-Stationary and Unknown Sources [J]. IEEE Access, 2016, 4: 2408–2428. DOI:10.1109/access.2016.2544060
- [13] COVER T M, THOMAS J A. Elements of Information Theory [M]. USA: John Wiley & Sons, 1991

作者简介



胡杰, 电子科技大学信息与通信工程学院副教授、硕士生导师; 主要研究方向为无线通信与组网中的物理层设计和资源分配、无线数能一体化传输关键技术等; 现主持国家自然科学基金青年项目1项, 主持重点基金项目2项; 已发表论文30余篇, 授权及申请国家发明专利7项, 出版英文著作1部。



李梦媛, 电子科技大学信息与通信工程学院信息与通信工程专业在读硕士研究生; 主要研究方向为应用于无线数能协同传输中的编码问题。



杨鲲, 英国埃塞克斯大学主席教授, 电子科技大学信息与通信工程学院兼职特聘教授, 担任多个顶级IEEE期刊的编委和顶级IEEE会议的技术委员会主席; 主要研究方向为无线网络和通信、无线数能一体化传输技术、计算与通信协作技术以及未来互联网技术等; 主持多项欧盟、英国国家自然科学基金项目; 已发表论文200余篇, 授权及申请中国专利多项, 出版英文专著1部。