

第3章

基于多向中继信道场景的网络编码技术

前面的章节主要研究了多址接入中继信道场景下的联合信道编码的网络编码传输方案,如何将相应的联合编码方案应用于多向中继信道场景,也是联合编码研究的一个重要方向。

3.1 引言

中继通信技术一般分为单向中继通信与双向中继通信两种通信网络,如图 3-1 所示。单向中继通信系统中,即一个信源节点通过中继节点向一个信宿节点发送信息,中继节点最常用的两种中继协议为:放大转发(Amplify and Forward, AF)与译码转发(Decoded and Forward, DF),除了这两种最常用的协议外还有压缩转发(或者称为估计转发或者称为量化转发)。放大转发协议对噪声有放大作用,而译码转发则是一种干扰受限的协议,根据链路条件自适应的选择前面两种协议中之一的方法通常称之为自适应中继转发协议。

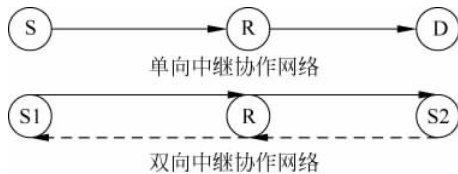


图 3-1 单、双向中继协作网络示意图

在香农 1961 年提出双向通信以来,双向通信系统模型就成为无线通信研究领域的一个基本模型。双向中继协作通信是指两信源节点通过中继节点互相交换信息。在单向中继协作通信系统的研究基础上,双向中继协作顺其自然地成为协作通信系统的一个基本模型,成为无线通信领域众多研究者的对象之一。如何将单向中继协作通信的协议应用到双向中继协作通信中是协作通信的研究热点,但由于放大转发具有噪声放大及累积的负面作用,而译码转发具有干扰受限的约束,将他们直接应用到双向中继通信网络中需要进行一定改进。由于网络编码能够进一步增加网络吞吐量,所以网络编码在通信研究领域受到了广泛关注,各种各样网络编码方式相继提出,并且在实际应用中也得到相应的证实。目前,研究比较广泛的网络编码方式主要有:模拟网络编码、数字比特异或网络编码、去噪转发网络编码、物理层网络编码。图 3-2 给出了双向中继协作通信网络的几种协作方法示意图。

在双向中继信道(Two-way Relay Channel, TWRC)场景中,典型的系统模型包括三个节点,即用户 A、用户 B 和中继 R。A 和 B 之间希望互传信息,其中的传输距离超出了发射机的覆盖范围,所以不能直接通信,而需要通过中继 R 协助通信。在传统的设计中,A 传送包到 R,R 转发给 B,B 传送包到 R,R 转发给 A,整个过程需要 4 个时隙,如图 3-2(a)所示。

而利用网络编码的方法,如采用基于异或操作的网络编码方法,A 和 B 可以分别传送各自的包给 R,R 将其做异或(XOR)运算,然后以广播的形式将此编码过的包 $A \oplus B$ 同时发送给 A 和 B,A 利用自己的包与编码的包进行 XOR 运算,可以恢复出 B 的包,即

$A \oplus B \oplus A = B$; B 也以同样的方式恢复出 A 发来的包,这个过程利用了网络中的冗余来压缩信息,在一个时隙中传送两个包,总共以三个时隙完成通信过程,节省了一个时隙,提高了吞吐量,如图 3-2(b)所示。

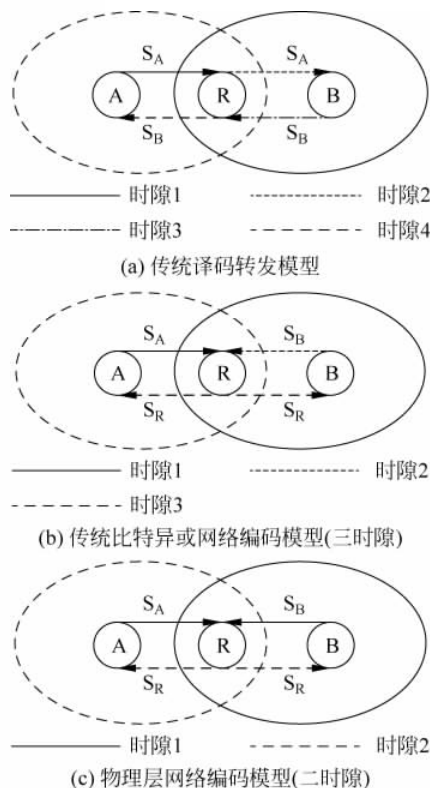


图 3-2 双向中继协作网络协议时隙比较图

为了进一步减少时隙和提高吞吐量,可充分利用无线媒质的广播属性,引入物理层网络编码和模拟网络编码的概念,如图 3-2(c)所示。A 和 B 同时传送信号到 R, R 接收到的将是 A 和 B 的混合信号,由于 R 不能对其进行比特级编码,因此 R 仅仅是起到一个中继的作用,将混合信号转发给 A 和 B。在物理层网络编码方法中,针对节点处具体的调制方式,可以建立红映射机制,其编码运算发生在信号级,利用这种映射机制以及节点 A 和 B 处各自的信息,在节点 A 和 B 解出对方节点发来的信息。而在模拟网络编码中, A 和 B 同时向 R 传输信号, R 放大接收到的互相干扰的混合信号,并以广播的形式发射出去, A 接收到信号以后,从中减去已知的自己的信号,从而恢复出 B 传输来的信号, B 对接收到信号做类似的处理,整个过程只需要两个时隙,从而获得了更高的吞吐量。

图 3-2 的双向中继信道场景典型模型可以推广到各种其他复杂的情形。通过网络编码的方法可以有效地提高吞吐量,然而在减少传输时隙的同时,可靠度有一定的下降,且网络编码的复杂度相比传统方法也有一定程度的增加。在实际应用中,可以根据需要在吞吐量、可靠性和复杂度上折中地选择合适的网络编码方法。适用于双向中继信道场景

的网络编码方法将在后面的章节中详细介绍。

3.2 三时隙比特异或网络编码方案

网络编码是指允许中继节点同时向多个结点发送多个信息流的某种组合信息,同时每个接收节点可以利用自身已知信息结合接收到的组合信息,可以得到所需要的目标信息的一种通信方式。网络编码可以增加网络吞吐量,提高网络安全性。图 3-3 是给出蔡宁等教授提出的网络编码的蝶形示意图。中继节点对接收到两信源信息进行译码解调获得的比特流进行比特异或,然后对比特异或结果进行编码调制后转发。中继节点经过这样处理后,两终端节点利用比特异或及自身信息同样可以获得两个信源的信息,这样可以节省信息传递时隙数。如图 3-3 所示,从六个时隙减少到了四个时隙。

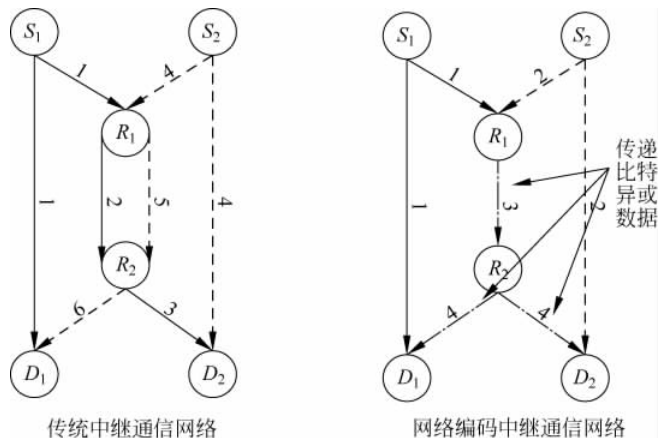


图 3-3 网络编码蝶形示意图

目前,比较常见网络编码方式有基于放大转发协议的模拟网络编码、基于译码转发的比特异或网络编码、去噪转发网络编码,还有与信道编码、叠加码等相结合的网络编码方式。由于物理上的限制,假设系统中, S_1 、 S_2 以及中继节点 R 只能进行半双工通信。这同时也意味中 S_1 与 S_2 之间不存在直传链路。也就是说,信源节点 S_1 、 S_2 通过中继节点 R 互相交换信息, x_1 、 x_2 分别是信源节点 S_1 、 S_2 向中继节点发送的信号,则中继节点的接收信号为

$$y_r = hx_1 + gx_2 + n_r \quad (3-1)$$

其中, h 、 g 分别为信源节点 S_1 、 S_2 到中继节点 R 的信道系数(包含发射功率在其中), $E(|x_i|^2)=1, i=1,2$, n_r 为加性复高斯白噪声,即 $n_r \sim C(0,1)$ 。

译码转发协议是中继协作通信网络中的一种经典协议,其中继节点处理简单,而在中继协作通信网络中受到广泛研究。译码转发网络编码的基本原理也是利用译码转发协作,即中继节点对接收到的混合信号进行简单的译码处理后,转发给两个信源节点。本书中将不再介绍译码转发协议,仅介绍传输占用三个时隙的传统比特异或网络编码方

案^[47]和传输占用两个时隙的物理层网络编码(Physical Network Coding,PNC)方案。

比特异或网络编码的基本思想是基于单向中继协作通信中的译码转发协议,但中继节点是同时对接收到两个信号进行比特异或后进行编码调制处理转发给信源节点。比特异或网络编码主要分为三个时隙。

第一时隙,信源节点 S_1 向中继节点 R 发送信息,即

$$y_{r,1} = hx_1 + n_r \quad (3-2)$$

中继节点 R 对接收到的信号 $y_{r,1}$ 进行译码解调操作,即得信号 x_1 的比特信息流 $\tilde{b}_1$;

第二时隙,信源节点 S_2 向中继节点 R 发送信息,即

$$y_{r,2} = gx_2 + n_r \quad (3-3)$$

中继节点 R 对接收信号 $y_{r,2}$ 进行译码解调,即得信号 x_2 的比特信息流 $\tilde{b}_2$;

第三时隙,中继节点对前两个时隙得到的比特流进行比特异或操作,然后进行编码调制,得到中继节点的转发信息 x_r ,即

$$x_r = \mathcal{M}(\mathcal{C}(\tilde{b}_1 \oplus \tilde{b}_2)) \quad (3-4)$$

其中, $\mathcal{M}$ 表示调制映射, $\mathcal{C}$ 表示信道编码, $\oplus$ 表示异或运算。

中继节点向信源节点广播信息 x_r ,信源节点 S_1 的接收信息为

$$y_1 = hx_r + n_1 \quad (3-5)$$

信源节点对 y_1 译码解调后得到比特流 $\tilde{b}_{r,1}$ 后,利用自身已知的发射比特流 b_1 与 $\tilde{b}_{r,1}$ 进行比特异或,即可获得所需要的信息,即

$$\hat{b}_2 = b_1 \oplus \tilde{b}_{r,1} \quad (3-6)$$

同理,信源节点 S_2 也可以获得所需要的信息。

译码转发(DF)方案和三时隙比特异或网络编码方案的流程框图分别如图 3-4 和图 3-5 所示。

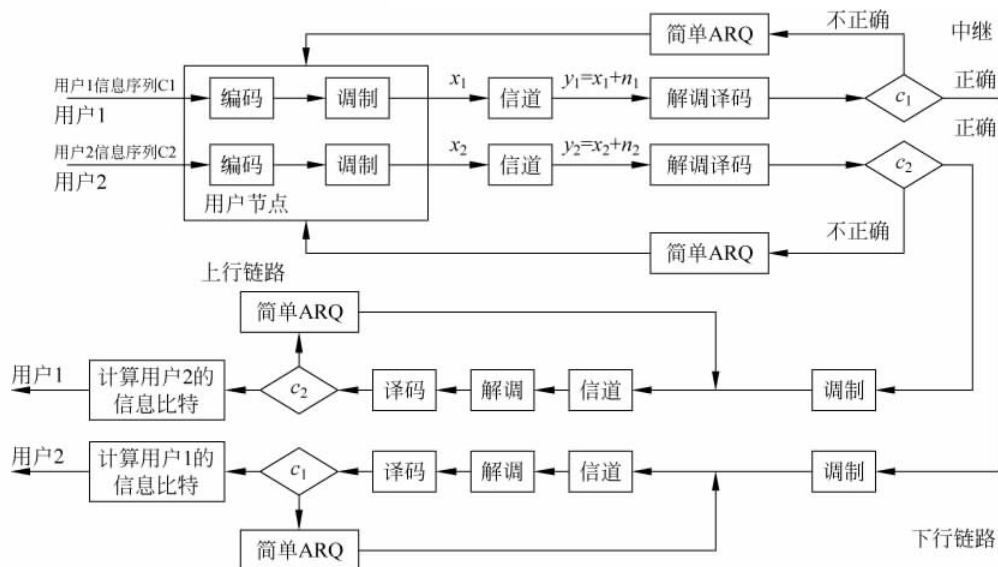


图 3-4 DF 方案的信息处理流程框图

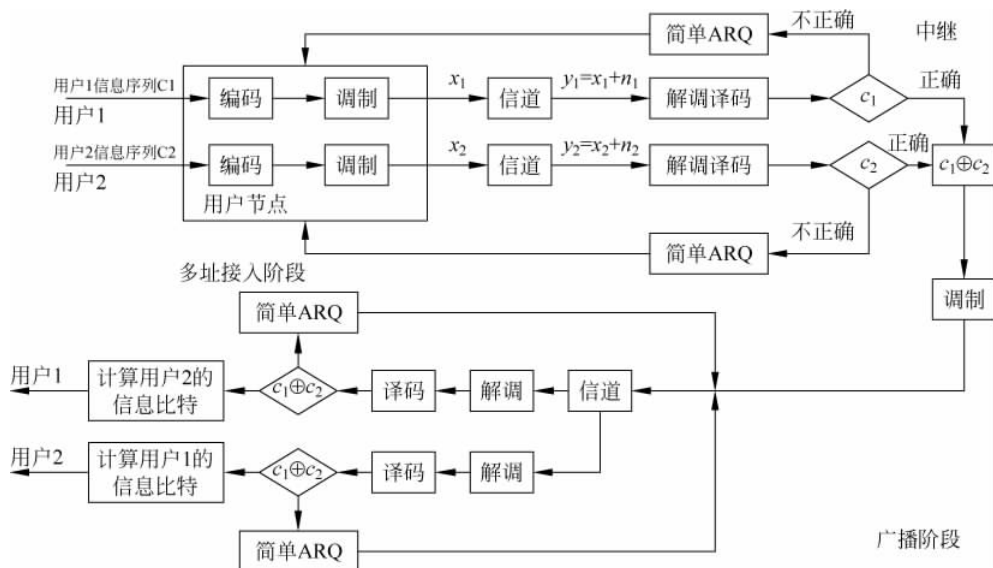


图 3-5 三时隙网络编码方案的信息处理流程框图

3.3 双时隙比特物理层网络编码方案

在无线通信中,网络编码可以分为模拟网络编码和数字网络编码两种方式。数字网络编码是在数据包的层面进行编码,即进行网络编码的节点对接收到的数据包进行逐比特的异或编码。进行网络编码的节点同时需要具有解码的功能。数字网络编码具有试图避免多源发射的信号之间一起编码产生的干扰的优点。而物理层(模拟)网络编码是一种处理电磁波信号接收和调制的物理层的网络编码,通过中继节点处的恰当的调制调解技术,电磁波的叠加信号能被映射到数据比特流叠加的高斯域中,使得干扰变成了网络编码中算法操作的一部分。

放大转发网络编码具有噪声放大作用,比特异或网络编码需要三个时隙,为了同时消除噪声放大及三个时隙的影响,文献[48]提出了物理层去噪转发网络编码的基本思想,其基本思想是中继节点合理设计一种去噪映射函数关系,将中继节点接收到混合信息进行某种映射后得到两个的某种关系,然后转发给信源节点,信源节点可以利用自身信号及接收到混合信号后,利用逆映射关系得到所需要的信息。

下面以简单的例子来解释说明物理层去噪转发网络编码的思想。当两用户的信道系数相同且为1(AWGN信道)时,信源节点采用二进制星座映射(BPSK)为 $\mathcal{M}(0)=-1, \mathcal{M}(1)=1$ 的情况下,中继节点接收的信号可以表示为

$$y_r = x_1 + x_2 + n_r \quad (3-7)$$

中继节点利用最大似然方法判别出两信源节点的发送信息,即

$$(\hat{x}_1, \hat{x}_2) = \underset{(x_1, x_2) \in \mathbb{S}^2}{\operatorname{argmin}} |y_r - x_1 - x_2| \quad (3-8)$$

其中, $\mathcal{S}^2$ 为 BPSK 星座映射函数对空间域, 然后利用去噪映射函数将最大似然判别法得的两个信号进行去噪映射差别中, 即

$$x_r = \mathcal{M}_r(\mathcal{C}_r(\hat{x}_1, \hat{x}_2)) \quad (3-9)$$

其中, $\mathcal{M}_r$ 为中继节点的调制映射, $\mathcal{C}_r$ 为中继节点的去噪映射函数。图 3-6 给出了去噪映射函数关系及相应的判别区域。因此, 在设计去噪映射函数时, 应该充分考虑信道系数信息, 相应地设计合理的去噪函数映射。

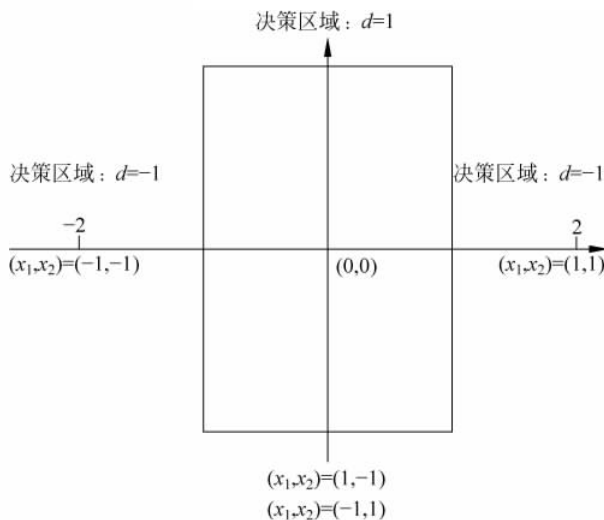


图 3-6 BPSK 调制, AWGN 调制, 映射函数及决策区域示意图

设用户 i 发送的信号为 $C_i = (c_{i,1}, \dots, c_{i,j}, \dots, c_{i,N})$, 其中 $i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, N, N$ 为数据包帧长。为了简化讨论, 假设采用 BPSK 调制。将经过调制的第 i 个用户的信息记为 $X_i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,j}, \dots, x_{i,N})$, 而中继 R 接收到的信号记为 $Y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_N)$ 。假设信道是 AWGN 信道, 则在传输过程中的某一时刻, 中继站接收到的信道值可表示为两个用户信息以及加性噪声的叠加(认为两个用户的数据同时到达):

$$y_j(t) = x_{1,j} \cos \omega_c t + x_{2,j} \cos \omega_c t + n(t) \quad (3-10)$$

其中, $\cos \omega_c t$ 代表载波, ω_c 代表载频, $n(t)$ 代表 AWGN 信道的加性噪声。利用相关解调, 则可得到经过解调的信号:

$$y_j = x_{1,j} + x_{2,j} + n \quad (3-11)$$

其中, $n \sim N\left(0, \frac{\sigma^2}{2}\right)$ 。

令 $\xi = x_1 + x_2$, x_1 与 x_2 为双极性信号, 则 ξ 可以表示为

$$\xi = \begin{cases} 0 & x_1 = 1, x_2 = -1 \text{ or } x_1 = -1, x_2 = 1 \\ 2 & x_1 = 1, x_2 = 1 \\ -2 & x_1 = -1, x_2 = -1 \end{cases} \quad (3-12)$$

令 $(c_1 \oplus c_2)$ 代表经过网络编码的比特, L 代表接收到信号 y 时网络编码比特为 $(c_1 \oplus c_2)$ 的对数似然比(LLR)概率。

$$L = \log \left\{ \frac{P(c_1 \oplus c_2 = 1 | y)}{P(c_1 \oplus c_2 = 0 | y)} \right\} \quad (3-13)$$

根据 x_i 和 c_i 之间的关系, $(c_1 \oplus c_2)$ 可以记为

$$c_1 \oplus c_2 = \begin{cases} 1 & | x_1 = 1, x_2 = -1 \text{ or } x_1 = -1, x_2 = 1 \\ 0 & | x_1 = 1, x_2 = 1 \text{ or } x_1 = -1, x_2 = -1 \end{cases} \quad (3-14)$$

根据式(3-12), 有

$$c_1 \oplus c_2 = \begin{cases} 1 & | \xi = 0 \\ 0 & | \xi = 2 \text{ or } \xi = -2 \end{cases} \quad (3-15)$$

这样一来, 式(3-13)就可以写成:

$$\begin{aligned} L &= \log \left\{ \frac{P(\xi = 0 | y)}{P(\xi = 2 \text{ or } \xi = -2 | y)} \right\} \\ &= \log \left\{ \frac{P(y | \xi = 0)P(\xi = 0)}{P(y | \xi = 2)P(\xi = 2) + P(y | \xi = -2)P(\xi = -2)} \right\} \\ &= \log \left\{ \frac{2P(y | \xi = 0)}{P(y | \xi = 2) + P(y | \xi = -2)} \right\} \end{aligned} \quad (3-16)$$

当加性高斯白噪声的噪声参数为 $\sigma^2/2$, 信道输入为 x 时, 信道输出为

$$P(y | x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{(y-x)^2}{\sigma^2}} \quad (3-17)$$

将式(3-17)代入式(3-15)中, 由接收信息 y , 则可得到网络编码比特 $(c_1 \oplus c_2)$ 的 LLR 值:

$$L = \log \left\{ \frac{P(c_1 \oplus c_2 = 1 | y)}{P(c_1 \oplus c_2 = 0 | y)} \right\} = \frac{4}{\sigma^2} - \log \left(\cosh \frac{4y}{\sigma^2} \right) \quad (3-18)$$

这样就完成了中继对在第一个时隙接收到的来自两个用户的叠加信号 y 进行软输出网络解调(Soft Network Demodulation, SND)后得到关于网络编码比特的 $(c_1 \oplus c_2)$ 对数似然比 LLR 的过程。图 3-7 展示了中继处实施物理层联合网络编码方案的流程图。

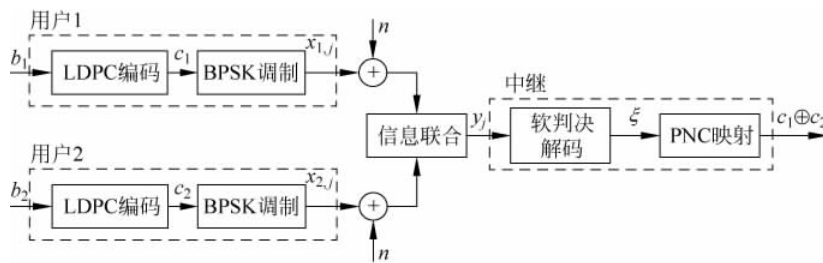


图 3-7 物理层网络编码方案中继处信号处理流程

表 3-1 表示去噪映射函数与比特异或功能间的关系, 也可以利用它来进一步加深理解。

表 3-1 比特异或与去噪映射函数的关系比较

比特流(b_1, b_2)		调制符号(x_1, x_2)		两信号和	比特异或值调制符号
1	1	1	1	2	-1
1	0	1	-1	0	1
0	1	-1	1	0	1
0	0	-1	-1	-2	-1

在得到关于 $(c_1 \oplus c_2)$ 的似然比信息 $L_{c_1 \oplus c_2}$ 后,将此似然比信息送往信道解码器进行解码。在这里假定用户所采用的信道编码器是线性的,在实际系统中使用的信道编码如卷积码,Turbo 码,LDPC 码等都是线性码。记信道编码过程为 $\Gamma(\cdot)$,即 $c_i = \Gamma(b_i)$ 。其中, $B_i = (b_{i,1}, \dots, b_{i,j}, \dots, b_{i,N})$ 为第 i 个用户需要发送的原始信息(未经过信道编码)。则对于线性信道编码器,有:

$$c_1 \oplus c_2 = \Gamma(b_1 \oplus b_2) = \Gamma(b_1) \oplus \Gamma(b_2) \quad (3-19)$$

据此,我们就可以对其进行进一步的信道解码,最后译出原始的用户信息。

应当注意到,上述方案的设计均在 AWGN 信道的假设下完成,没有考虑到信道衰落的因素。然而,TWRC 的主要应用场景是无线设备接入,在这种场景下,信道往往是衰落的。因此,我们还需为双向中继衰落信道场景设计相应的二时隙物理层网络编码方案。

传统的联合编码方案中中继节点处的网络编码在信道解码之后进行,现在使网络编码在信道解码之前进行。衰落信道下二时隙物理层网络编码方案的信息处理流程图如图 3-8 所示。具体的处理流程如下:

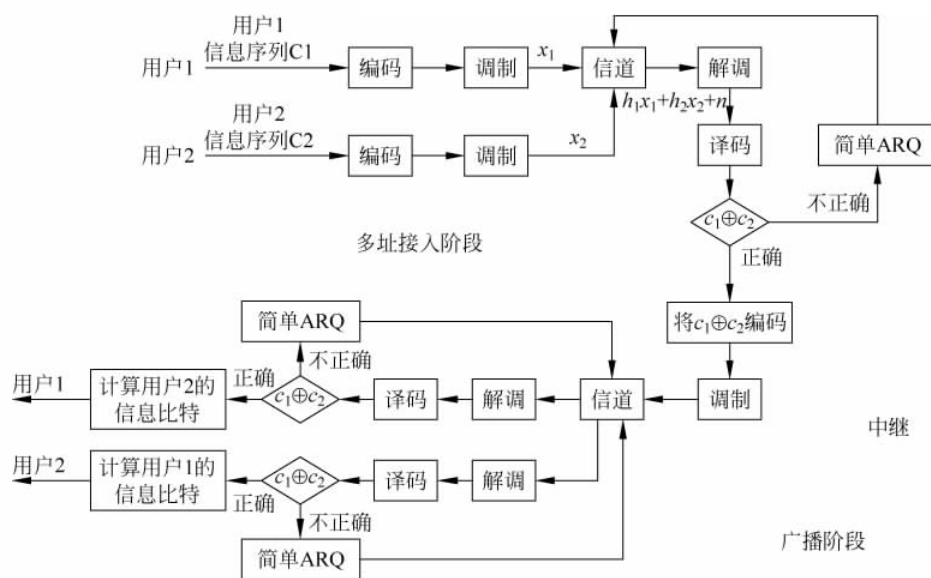


图 3-8 衰落信道下二时隙网络编码方案的信息处理流程框图

(1) 用户 1 和用户 2 信息序列 c_1 和 c_2 分别进行编码,调制之后,同时向中继发送符号序列 x_1 和 x_2 ;

(2) 相应的,中继接收符号为: $y = h_1 x_1 + h_2 x_2 + n$, 这里 n 为复值高斯变量, 方差为 $2\sigma^2$;

(3) 中继通过表 3-2 中的映射关系, 以及式 (3-20), 对叠加的接收信号进行解调, 计算出异或信号的对数似然比;

$$\begin{aligned}
 L &= \ln \left\{ \frac{P(c_1 \oplus c_2 = 0 | y)}{P(c_1 \oplus c_2 = 1 | y)} \right\} \\
 &= \ln \left\{ \frac{P(y | \xi = h_1 + h_2) + P(y | \xi = -(h_1 + h_2))}{P(y | \xi = h_1 - h_2) + P(y | \xi = h_2 - h_1)} \right\} \\
 &= -\frac{|y|^2 + |h_1 + h_2|^2}{2\sigma^2} + \ln \left\{ \exp \left[\frac{\operatorname{Re}\{y \cdot (h_1 + h_2)^*\}}{\sigma^2} \right] + \exp \left[-\frac{\operatorname{Re}\{y \cdot (h_1 + h_2)^*\}}{\sigma^2} \right] \right\} \\
 &\quad + \frac{|y|^2 + |h_1 - h_2|^2}{2\sigma^2} - \ln \left\{ \exp \left[\frac{\operatorname{Re}\{y \cdot (h_1 - h_2)^*\}}{\sigma^2} \right] + \exp \left[-\frac{\operatorname{Re}\{y \cdot (h_1 - h_2)^*\}}{\sigma^2} \right] \right\} \\
 &= \frac{|h_1 - h_2|^2 + |h_1 + h_2|^2}{2\sigma^2} + \operatorname{Incosh} \left[\frac{\operatorname{Re}\{y \cdot (h_1 + h_2)^*\}}{\sigma^2} \right] - \operatorname{Incosh} \left[\frac{\operatorname{Re}\{y \cdot (h_1 - h_2)^*\}}{\sigma^2} \right]
 \end{aligned} \tag{3-20}$$

表 3-2 PNC 叠加信号与异或信号映射表

$\xi = h_1 x_1 + h_2 x_2$	$c_2 \oplus c_2$	x_1	x_2	概率
$h_1 + h_2$	0	+1	+1	1/4
$-(h_1 + h_2)$	0	-1	-1	1/4
$h_1 - h_2$	1	+1	-1	1/4
$-(h_1 - h_2)$	1	-1	+1	1/4

(4) 随后进行译码, 并判断中继译码结果是否为 $c_1 \oplus c_2$ 。若译码结果不为 $c_1 \oplus c_2$, 则各用户再次重传数据。此时, 中继接收的信号表示为式 (3-21):

$$\begin{aligned}
 y &= y^1 + y^2 = h_1^1 x_1 + h_2^1 x_2 + n_1 + h_1^2 x_1 + h_2^2 x_2 + n_2 \\
 &= (h_1^1 + h_1^2) x_1 + (h_2^1 + h_2^2) x_2 + n_1 + n_2
 \end{aligned} \tag{3-21}$$

(5) 对 $z = c_1 \oplus c_2$ 进行编码, 调制后, 广播给两个用户;

(6) 第 $i(i=1, 2)$ 用户对接收信号为: $r_i = h_i^{RU} z + n_i^{RU}$, 对接收信号进行解调和译码;

(7) 各用户译码结果不为 $c_1 \oplus c_2$, 则中继再次重传, 各用户接收端进行 MRC 合并后解调译码。

3.4 仿真分析

为了评估和对比系统性能, 研究物理层网络编码对系统吞吐量(tp)的提升作用, 我们将 tp 定义为单位时隙内两个用户之间正确传送的数据包的平均数量, 如此, 我们以 tp 为性能指标来评估几种不同的系统模型。我们将分别对比不使用网络编码的传统译码-转发方案、第 3.2 小节提出的三时隙比特异或网络编码方案以及第 3.3 小节提出的双时隙比特异或网络编码方案。

需要注意的是, 在理想状态下, 也就是假设每次均能正确译码时, 我们可以分别计算

出不同转发模式下的系统吞吐量上限：传统译码转发系统的吞吐量上限为 0.5；三时隙网络编码系统的吞吐量上限为 $2/3$ ；双时隙物理层网络编码系统的吞吐量上限为 1。

为了计算系统的 tp ，我们引入了自动重传请求 (Automatic Repeat-Request, ARQ) 机制。每个接收节点在收到信息包后，会自动校验译码过程是否正确，如不正确，则会向发送端请求重传。这种 ARQ 机制有效保证了信道质量不佳时的系统通信质量。

接下来，我们将基于软件仿真，给出上述三种方案的系统性能比较。为了简化问题，我们假设两个用户到中继的链路质量相等，且上下行链路平等，均为 AWGN 信道。调制方式选用 BPSK，且中继站确知信道状态信息。信道编码方式选用 (3,6) 规则 LDPC 码，码率为 0.5，码字长度为 1088bit。

图 3-9 展现的是不同方案在 AWGN 信道下的系统吞吐量对比，信噪比等于 E_s/σ^2 。由图可见，引入网络编码技术，能够显著提升系统的容量与吞吐量性能。在信道信噪比小于 -4dB 时，传统 DF 方案拥有最好的性能；在信道信噪比大于 -4dB 、小于 -0.87dB 时，三时隙网络编码方案具有较优性能。这是因为在信道质量不佳时，物理层网络编码方案需要较多的重传次数以保证信息的正确传输，导致了系统整体吞吐量的制约。然而，当信道质量提升，信噪比大于 -0.87dB 时，双时隙物理层网络编码方案性能显著提升。总体而言，相较于传统的 DF 方案，三时隙网络编码方案最多可以讲系统的吞吐量性能提升 33.3%，双时隙物理层网络编码方案最多可以将系统的吞吐量性能提升 100%。

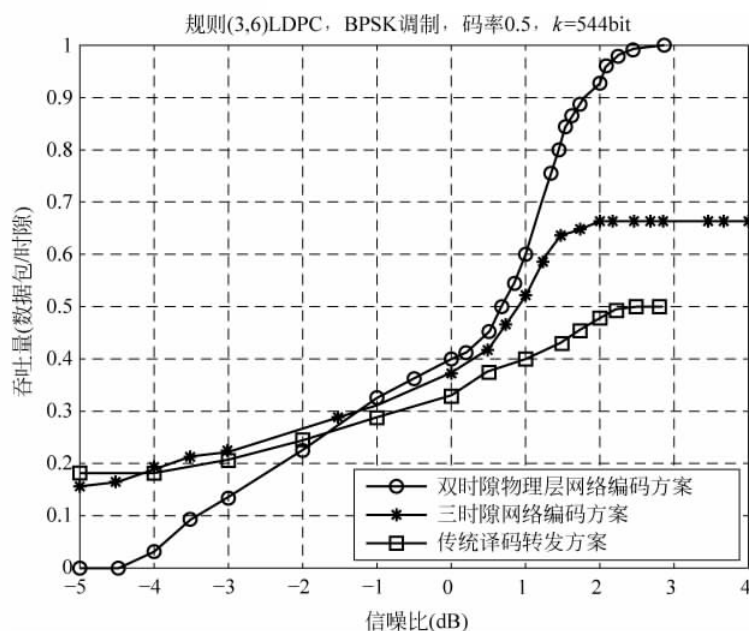


图 3-9 不同方案的系统在 AWGN 信道下的 tp 对比

对于衰落信道，我们也进行了相应的仿真。调制方式选用 BPSK，信道为瑞利衰落信道。信道编码方式选用 (3,6) 规则 LDPC 码，码率为 0.5，码字长度为 1088bit。

图 3-10 展现的是不同方案在瑞利衰落信道下的系统 tp 对比，信噪比为 E_s/σ^2 。由图

可见,在信道信噪比小于 0.7dB 时,三时隙网络编码方案拥有较高的系统吞吐量;信噪比大于 0.7dB 时,双时隙物理层网络编码方案性能显著提升。总体而言,3.3 节中针对衰落信道提出的改进型双时隙物理层网络编码方案能够有效地提升系统在瑞利衰落信道下的吞吐量性能。

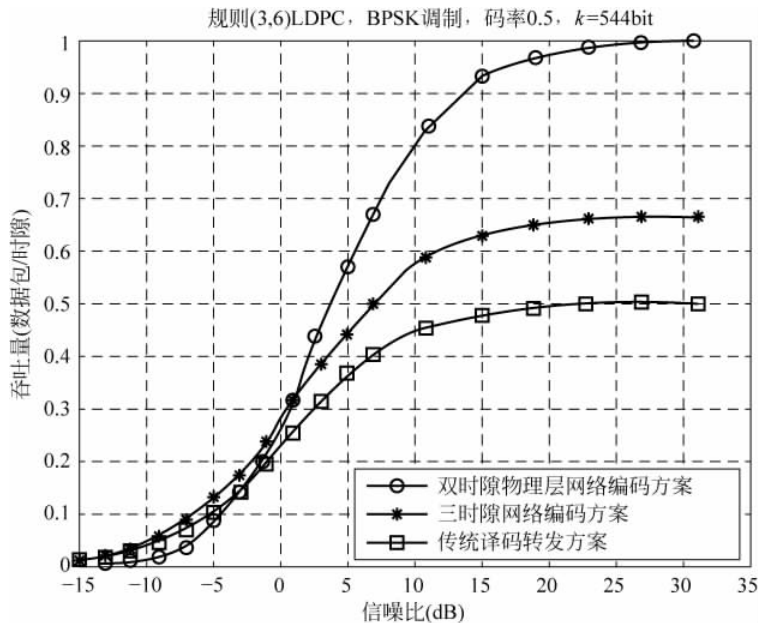


图 3-10 不同方案的系统在瑞利衰落信道下的吞吐量对比

3.5 多向中继信道下的网络编码

无线通信中的吞吐量是衡量系统性能的一个重要指标。比如,下一代无线通信要求 10Gbps 的数据速率。网络编码最初被用于无损有线网络的多播场景中,以提升系统吞吐量。而利用无线通信的广播特性,物理层网络编码也可以通过叠加电磁信号的方式来提升无线系统的吞吐量。在包含双用户节点与单中继节点的双向中继信道下,采用物理层网络编码可以将系统吞吐量最高提升 100%。文献[50]研究了多个用户节点利用单个中继节点转发数据包的网络拓扑结构下,数字信号和模拟信号网络编码的时延及吞吐量。根据文献[50]的研究, N 节点多向中继信道下,传统路由方案的系统平均吞吐量为 $\frac{1}{2N}$ sym/S/CU,传统网络编码的系统平均吞吐量为 $\frac{1}{2N-1}$ sym/S/CU,而物理层网络编码的系统平均吞吐量为 $\frac{1}{2N-2}$ sym/S/CU(吞吐量的单位为符号每节点每信道)。由此可见,当用户节点的数量增加时,物理层网络编码方案相较于传统路由方案的吞吐量增益减少了。文献[51]提出了复数域网络编码方案(Complex Field Network Coding, CFNC),在复数域进行网络编码操作,获得了可观的吞吐量,然而,当用户数增加时,系统的性能会

急剧恶化。文献[49]中提出了一种二进制信号的检测转发(Detect-and-Forward)路由方案。对于 N 个用户节点通过一个中继节点通信的多向中继网络而言,文献[49]中提出的方案可以得到至少 $\frac{2}{3N}\text{sym/S/CU}$ 的系统平均吞吐量。基于其二进制信号的制约,该方案适用于 BPSK 和 QPSK 调制,但不适用于更高阶的调制方式。

本章节基于基础的双向中继网络编码技术提出一种适用于多向中继通信的多级网络编码方案。传输信息时,用户两两配对向中继发送用户信息,中继接收到叠加的用户信息符号后,以硬判决的方式检测这两个符号是否同号,若两用户发送的符号异号(硬判决检测为 0),则在这两个用户节点中选出一个进行下一轮的双向中继网络编码操作。通过理论分析和软件仿真,本章节证明了采用该方案,系统的平均吞吐量能提升至 $\frac{3}{4N}\text{sym/S/CU}$ 。这个结果相较于传统路由方案的系统平均吞吐量提升了 50%,相较于文献[49]中提出的网络编码方案也提升了 12%。

3.5.1 系统模型

如图 3-11 所示,本节主要研究一个包含 N 个用户节点($S_1, S_2, \dots, S_N$)以及一个中继节点 R 的多向中继信道网络。为了使这 N 个用户节点完成信息交互,每个节点都需获知其他所有节点的用户信息。假设任何两节点之间都不存在直连链路,则每个节点的用户信息都必须首先通过上行链路送达中继节点,然后中继通过译码,将其广播至每个用户节点。另外,假设所有节点时间同步,并工作在半双工状态下。

对于这种 N 节点的网络拓扑,要达到信息的全交互,使用传统路由方案时需要使用 $2N$ 次信道。因此,此时系统的平均吞吐量为 $\frac{1}{2N}\text{sym/S/CU}$ 。使用文

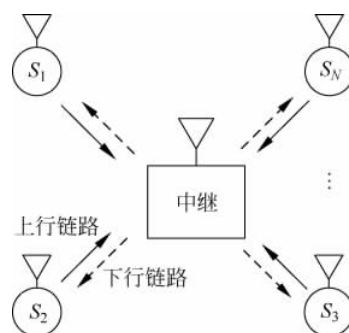


图 3-11 多向中继信道系统模型

献[49]中提出的网络编码方案时则需要使用 $\frac{3N}{2}$ 次信道,此时系统的平均吞吐量为 $\frac{2}{3N}\text{sym/S/CU}$ 。而使用本节提出的多级网络编码方案时,需要使用 $\frac{4N}{3}$ 次信道,此时系统的平均吞吐量为 $\frac{3}{4N}\text{sym/S/CU}$ 。下文将详细介绍该多级网络编码方案。

3.5.2 传输方案的原理及处理流程

在双向中继网络编码中,两个用户节点在同一时隙内同时将二进制信号 S_1 和 S_2 通过上行链路传给中继($S_1, S_2 \in \{-1, +1\}$),然后中继对叠加信号 $S_1 + S_2$ 进行译码判决,再在下一时隙将判决结果通过下行链路广播给所有用户节点。首先,为了简化讨论,假设

所有传输过程均为无差错传输。因此,中继接收到的叠加信号的值属于集合 $\{-2, 0, +2\}$ 。如果叠加信号的值 $+2$ (或 -2),则说明两个用户传输的信号的值都为 $+1$ (或 -1),经过中继广播,全部用户节点都能得到 S_1 和 S_2 的值。因此, S_1 和 S_2 完成了信息交互。如果叠加信号的值 0 ,则说明两个用户传输的信号彼此异号,为了得到 S_1 和 S_2 的值,需选中其中一个信号(如 S_1)参与下一级网络编码操作,直至 S_1 完成信息交互。得到 S_1 的值之后,就可以通过异号关系得到 S_2 的值, $S_2 = -S_1$ 。对于 N 个用户节点,完成一级网络编码操作需要进行 $\left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor$ 次双向网络编码。一级网络编码操作结束后,从每一对彼此异号的节点中选出一个节点,即可得到下一级网络编码操作的用户节点集合。直至所有用户节点完成信息交互,网络编码操作停止。

多级网络编码操作的传输方案如下:

初始化 初始用户节点集合 $C^0 = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$,节点数 $M^0 = N$,迭代级数 $lter = 0$,已进行的双向中继网络编码操作次数 $N_{TWRC} = 0$ 。

步骤一 对于第 $lter$ 级网络编码,需要进行 $\left\lfloor \frac{M^{lter}}{2} \right\rfloor$ 次双向中继网络编码操作。此级网络编码完成后,已进行的双向中继网络编码操作次数为 $N_{TWRC} = N_{TWRC} + \left\lfloor \frac{M^{lter}}{2} \right\rfloor$ 。对于每对用户节点 $[C_{2i-1}^{lter}, C_{2i}^{lter}]$,进行双向中继网络编码操作,其中 $i \in \left[1, \left\lfloor \frac{M^{lter}}{2} \right\rfloor\right]$ 。如果中继接收到的叠加信号为 0 ,即 $C_{2i-1}^{lter} + C_{2i}^{lter} = 0$,则选择 C_{2i-1}^{lter} 加入节点集合 C^{lter+1} ,参与下一级的网络编码操作。应当注意到,如果此级网络编码的节点数 M^{lter} 为奇数,则应将剩下的最后一个节点 $C_{M^{lter}}^{lter}$ 加入节点集合 C^{lter+1} ,参与下一级的网络编码操作。这样一来就得到了下一级网络编码操作的节点集合 C^{lter+1} 以及节点个数 M^{lter+1} 。当 M^{lter} 为偶数,而且本级所有双向网络编码操作的叠加信号均不为 0 时, C^{lter+1} 为空且 $M^{lter+1} = 0$ 。

步骤二 $lter = lter + 1$ 。如果 $M^{lter} > 1$,则跳转至步骤一进行下一级迭代。如果 $M^{lter} = 1$,则以传统路由方案转发唯一的一个节点的用户信息, $N_{TWRC} = N_{TWRC} + 1$ 。如果 $M^{lter} = 0$,则停止迭代,此次多级网络编码所使用的信道次数为 $2N_{TWRC}$ 。

下面以三个用户节点的场景为例($N=3$)详细描述多级网络编码方案的操作流程。首先初始化用户节点集合为 $C^0 = \{S_1, S_2, S_3\}$,迭代次数 $lter = 0$,已进行的双向中继网络编码操作次数 $N_{TWRC} = 0$ 。第一步,对 S_1 和 S_2 进行双向中继网络编码操作,存在如下两种可能。

可能一 如果叠加信号 $S_1 + S_2$ 不为零,即 $S_1 + S_2 = \pm 2$,则三个用户节点都可以推知 S_1 和 S_2 同号,且 $S_1 = S_2 = \pm 1$ 。因此下一级网络编码操作的节点集合为 $C^1 = \{S_3\}$ 。又因 $M^1 = 1$,所以对 S_3 采用传统路由方案转发。在这种情况下,三节点完成信息交互需要使用4次信道,出现这种场景的概率为 0.5 。

可能二 如果叠加信号 $S_1 + S_2$ 为零,即 $S_1 + S_2 = 0$,则三个用户节点都可以推知 S_1 和 S_2 异号。因此下一级网络编码操作的节点集合为 $C^1 = \{S_1, S_3\}$ 。又因 $M^1 = 2$,所以对 S_1 和 S_3 进行双向中继网络编码操作。在此之后,三节点已知所有用户节点之间的同/异

号关系,根据自己的用户信息,就能推知其他所有节点的用户信息。在这种情况下,三节点完成信息交互需要使用 4 次信道,出现这种场景的概率为 0.5。

结合上述两种情况的分析,可以得知,三用户节点的场景平均占用信道数为 $\frac{4N}{3}=4$ 。对于 N 节点的多级网络编码场景,也可证明:当 N 足够大时,系统完成信息交互所需平均占用信道数为 $\frac{4N}{3}$ 。

证明:

对于 N 节点的多级网络编码场景,在步骤一中,需要进行 $\left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor$ 次双向中继网络编码操作,即需占用 $2 \times \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor$ 次信道。当 N 足够大时,可近似视为占用 N 次信道。对于任意一对用户,二者异号的概率是 0.5,所以下一级网络编码操作的用户数为 $\frac{N}{2}$,下一级需要进行的双向中继网络编码操作次数为 $\frac{1}{2} \times \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor$,可近似视为 $\frac{N}{4}$ 。同样的,对于第 m 级网络编码操作,需要占用的信道数约为 $\frac{N}{4^{m-1}}$ 。因此,该方案所占用的平均信道数可按照式(3-22)近似推导。

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{N}{4^{m-1}} = \frac{4N}{3} \quad (3-22)$$

所以,该方案的系统平均吞吐量为 $\frac{3}{4N} \text{sym/S/CU}$ 。显然,这个结果相较于传统路由方案的平均吞吐量提升了 50%,相较于文献[49]提出的二进制信号网络编码方案的平均吞吐量提升了 12.5%。

以上结果都是基于无损信道的前提得到的,接下来讨论噪声信道的场景。对于噪声信道,比如 AWGN 信道,本节提出的多级网络编码方案基于三电平脉冲幅度调制(3-Pulse Amplitude Modulation, 3-PAM),所以相较于文献[49]提出的基于 $N+1$ -PAM 的二进制信号网络编码方案拥有较低的错误概率。不同的 N -PAM 的错误概率在文献[49,图 7]中进行了比较。

对于 AWGN 信道,中继处接收到叠加信号后的译码判决过程如下。中继接收到的叠加信号如公式(3-23)所示

$$y = x_1 + x_2 + n = c + n \quad (3-23)$$

其中, $x_1, x_2 \in (-\sqrt{E}, \sqrt{E})$, E 是 BPSK 调制符号 x_1 的能量, n 是单边功率谱密度为 N_0 的加性高斯白噪声, c 是 3-PAM 调制符号。假设 x_1 和 x_2 等概分布,则 c_0, c_1, c_2 为非等概分布:

$$P(c_0 = x_1 + x_2 = -2\sqrt{E}) = P(c_2 = x_1 + x_2 = 2\sqrt{E}) = 0.25 \quad (3-24)$$

$$P(c_1 = x_1 + x_2 = 0) = 0.5 \quad (3-25)$$

3-PAM 调制符号的判决域如图 3-12 所示。可见根据最大后验概率(Maximum a

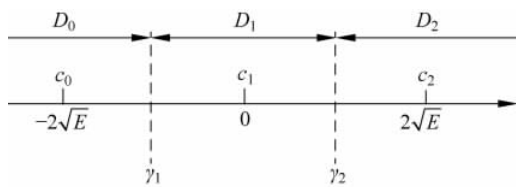


图 3-12 3-PAM 信号的判决域

posteriori Probability, MAP) 准则, 非等概分布的 3-PAM 调制符号的最优判决域门限如式(3-26)、式(3-27)所示^[52, 第4章]:

$$\gamma_1 = \frac{-N_0 \ln(2)}{4\sqrt{E}} - \sqrt{E} \quad (3-26)$$

$$\gamma_2 = \frac{N_0 \ln(2)}{4\sqrt{E}} + \sqrt{E} \quad (3-27)$$

因此, 我们可以得到如下推导

$$\begin{cases} \hat{x}_1 = \hat{x}_2 = -1 & y < \gamma_1 \\ \hat{x}_1 = \hat{x}_2 = 1 & y > \gamma_2 \\ \hat{x}_1 = -\hat{x}_2 & \gamma_1 \leq y \leq \gamma_2 \end{cases} \quad (3-28)$$

根据式(3-26)、式(3-27)和式(3-28), 中继和所有用户节点就能对解调后的信息进行应判决, 从而推知这对用户的原始信息。

3.5.3 性能分析

首先验证系统在无差错传输时的性能。图 3-13 显示了系统完成信息交互所需占用的平均信道数占传统路由方案完成信息交互所需占用的平均信道数的比率。实线代表本节提出的新型多级网络编码方案, 虚线代表文献[49]中提出的二进制信号网络编码方案。每次仿真都运行超过 10^6 次, 以保证精度和准确性。

由图 3-13 可见, 本节提出的方案占用信道次数占传统路由方案的比率迅速收敛至理论值 $\frac{4N}{3} \div 2N = \frac{2}{3} \approx 0.667$, 而二进制信号网络编码方案占用信道次数占传统路由方案的比率总在 0.71 和 0.75 间震荡。很明显的, 本节提出的方案的系统平均吞吐量要高于文献[49]中提出的二进制信号网络编码方案。

在有损信道下, 我们也进行了相应的仿真以测试系统性能。图 3-14 展示了 AWGN 信道下, 在用户节点数不同值时 (3, 6, 10, 20) 系统的误码率性能。实线代表本节提出的新型多级网络编码方案, 虚线代表文献[49]中提出的二进制信号网络编码方案。

由图 3-14 可见, 当用户节点数增加时, 二进制信号网络编码方案的性能急剧恶化, 而本节提出的新型多级网络编码方案则仅小幅恶化。所以, 本节提出的方案能在用户节点数较大时取得显著的能噪比增益。

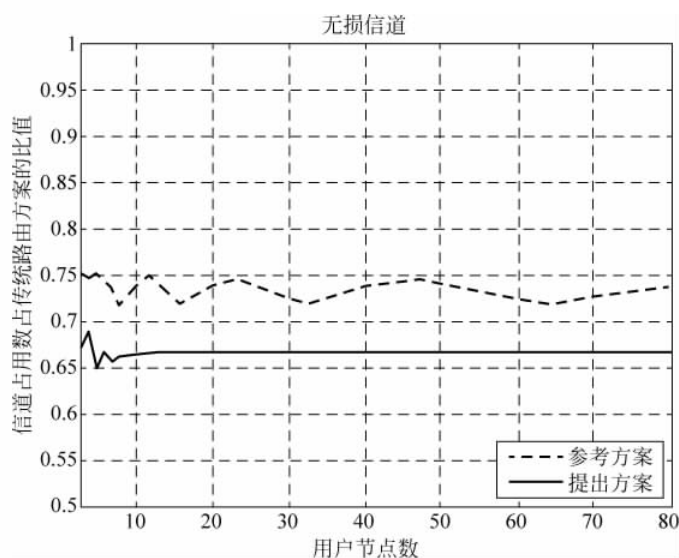


图 3-13 系统完成信息交互所需占用信道次数占传统路由方案的比率

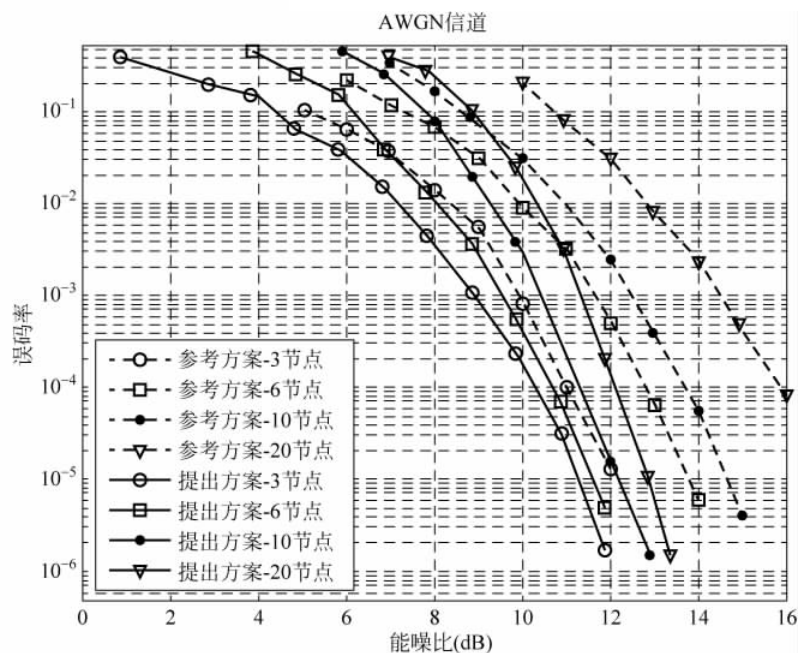


图 3-14 AWGN 信道下两种网络编码方案的误码率性能

3.6 本章总结

本章主要研究一个拥有两用户、一个双向中继站的多址接入中继系统，比较了此三种不同传输方案的性能。

首先是传统的译码-转发方案。译码转发方案中,两个用户轮流将信息发给中继,中继对其进行译码、校验,然后将信息重新编码,转发给不同用户。在理想的条件下,两个用户要完成相互之间一次信息包的传送,至少需要四个时隙。然后是三时隙的网络编码方案。在此方案中,两个用户轮流将信息发给中继,中继对其进行译码、校验,然后进行网络编码操作,将两路用户的信息组合起来,再将该合并信息广播给两个用户。两个用户收到这个合并信息后,就能够通过已有的己方的信息,推算出另外一个用户的信息。在这个方案中,理想条件下,两个用户要完成相互之间一次信息包的传送,至少需要三个时隙。最后是双时隙物理层网络编码方案,在该方案中,数据包的传输分为两个阶段:多址接入阶段和广播阶段。具体的,两个用户同时(占用同一时隙)将信息发给中继,中继站使用网络编码操作对接收的两个用户数据信息进行合并,将合并后的信息广播转发给用户。在这个方案中,理想条件下,两个用户要完成相互之间一次信息包的传送,至少需要两个时隙。

通过软件仿真证实,与存储-转发策略相比,使用网络编码能有效减少传输次数、增加网络吞吐量。相应的,网络的频谱利用率得以提高,传输单位比特信息消耗的能量减少。

另外,3.5节还提出了一个适用于多向中继信道的新型多级网络编码方案。该方案基于基础的多级-双向中继网络编码技术,可将 N 节点系统的平均吞吐量能提升至 $\frac{3}{4N}\text{sym/S/CU}$ 。本节通过理论分析和软件仿真证实,该方案相较于传统路由方案和二进制信号网络编码方案分别能取得50%和12%的系统吞吐量增益。由于基于3-PAM调制,该方案相比二进制信号网络编码方案具有可靠度高和复杂度低的优点。另外,该方案可以通过分别处理QPSK调制码元的同相分量和正交分量,使之适用于QPSK调制。总而言之,该方案具有简单、高效的特点。