

无线网络中基于 MPSK 的物理层网络编码^①王 静^② 刘向阳* 王新梅

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

(* 西安通信学院军事综合信息网教研室 西安 710106)

摘 要 提出了一种新的物理层网络编码方法,将无线网络中物理层网络编码采用的调制方法推广到八进制相移键控(8PSK)以及多进制相移键控(MPSK)。该方法在中继节点采用星座映射,将 MPSK 和信号星座映射到 MPSK 信号星座。接收节点收到 MPSK 信号后进行解调,借助已有信息进行译码(异或)操作,得到对方节点信息,完成信息交换。仿真验证了该方法的有效性,与已有的物理层网络编码方法相比,该方法在中继节点节约了 50% 的能量消耗,进一步提高了信息传输速率。

关键词 网络编码, 物理层, 信息交换, 多进制相移键控(MPSK)

0 引 言

网络编码技术^[1]是指让网络中的节点不仅拥有存储转发分组的能力,还能对数据进行编码操作。无线网络具有全向传输特性,一个网络节点发送的信息可以被其传输范围内的所有节点接收。将无线网络全向传输特性和网络编码技术相结合,可以提高无线网络信息交换的吞吐量^[2-4]。在无线网络进行信息交换的 straightforward 网络编码方法基础上,Zhang 提出了物理层网络编码^[5,6]。不同于数字比特流上的 straightforward 网络编码算法,中继节点将接收到的已调电磁波在不解调的情况下,直接进行编码(加和)操作,提高网络吞吐量,减少信息传输时间。本文将物理层网络编码采用的调制方法从正交相移键控(quadrature phase-shift keying, QPSK)推广到八进制相移键控(8PSK)以及多进制相移键控(M-ary phase-shift keying, MPSK),在进行信息交换的过程中,在中继节点进行星座映射,将两个 MPSK 信号的和信号星座映射到一个 MPSK 信号星座上,调制后发送到两个接收节点。接收节点解调后借助已有信息进行译码(异或),得到对方节点信息,完成信息交换。该方法与已有的物理层网络编码方法相比,在中继节点节约了 50% 的能量消耗,提高了信息传输速率。

1 物理层网络编码

在无线网络 $G = (V, E)$ 中, V 是节点集, E 是

链路集。考虑节点 N_1, N_3 通过中间节点 N_2 交换信息 S_1 和 S_3 。假定所有信号时间同步,载频和相位同步, S_1, S_3 的 QPSK 调制信号 $s_i(t), i = 1, 3$ 具有相同的相位和频率。图 1 是物理层网络编码实现框图,节点 N_1 和 N_3 在时隙 1 将 QPSK 调制信号 $s_i(t), i = 1, 3$ 同时发送到中继节点 N_2 , N_2 对接收到的两个 QPSK 调制信号直接进行加和操作,得到和信号

$$\begin{aligned} r_2(t) &= s_1(t) + s_3(t) \\ &= [a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t)] + [a_3 \cos(\omega t) + b_3 \sin(\omega t)] \\ &= (a_1 + a_3) \cos(\omega t) + (b_1 + b_3) \sin(\omega t) \end{aligned}$$

其中 a_i 和 b_i 是节点 N_i 的 QPSK 调制信息比特, ω 是载波频率。节点 N_2 收到两个信号,即同相信号 $I = a_1 + a_3$ 和正交信号 $Q = b_1 + b_3$ 。

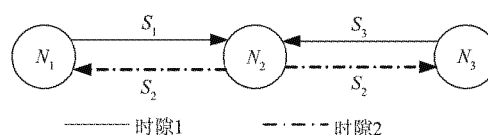


图 1 物理层网络编码

表 1 给出了物理层网络编码采用的具体 QPSK 调制/解调映射方案,得到节点 N_1 和 N_3 在 $GF(2)$ 域上的数字比特编码(异或)调制结果。QPSK 信号可以看成两个二进制相移键控(BPSK)调制信号即同相信号和正交信号叠加。表 1 中, $s_j^{(i)} \in \{0, 1\}$

① 863 计划(2007AA01Z215)和国家自然科学基金(60502046, 90604009, 60573034)资助项目。

② 女, 1982 年生, 博士生; 研究方向: 网络编码; 联系人, E-mail: jingwang@mail.xidian.edu.cn (收稿日期: 2007-12-03)

表示 N_j 节点发送信号的同相信息比特, $a_j \in \{-1, 1\}$ 表示 $s_j^{(I)}$ 的 BPSK 调制信号, $a_j = 2s_j^{(I)} - 1$, $s_j^{(Q)} \in \{0, 1\}$ 表示 N_j 节点发送信号的正交信息比特, $b_j \in \{-1, 1\}$ 表示 $s_j^{(Q)}$ 的 BPSK 调制信号, $b_j = 2s_j^{(Q)} - 1$ 。正交与同相信息比特具有相同的调制/解调映射关系。

表 1 物理层网络编码 QPSK 同相调制/解调映射

节点 N_1 (或 N_3) 的调制映射		节点 N_2 的解调映射		
		输入		
		输出		
		节点 N_2 的调制映射		
输入	输出	输入	输出	
$s_1^{(I)}(s_3^{(I)})$	$a_1(a_3)$	$a_1 + a_3$	$s_2^{(I)}$	a_2
1	1	2(或 -2)	0	-1
0	-1	0	1	1

节点 N_2 得到和信号 $r_2(t) = (a_1 + a_3)\cos(\omega t) + (b_1 + b_3)\sin(\omega t)$, 根据调制/解调映射表, 在时隙 2 将信号 $s_2(t) = a_2\cos(\omega t) + b_2\sin(\omega t)$ 发送到节点 N_1 和 N_3 。节点 N_1 和 N_3 对接收到的同相信号和正交信号分别采用 BPSK 解调映射, 得到信息比特 $s_2^{(I)}$ 和 $s_2^{(Q)}$ 。由于 $s_2^{(I)} = s_1^{(I)} \oplus s_3^{(I)}$, $s_2^{(Q)} = s_1^{(Q)} \oplus s_3^{(Q)}$, N_1 和 N_3 通过反操作(异或)分别得到 S_3 和 S_1 , 实现信息交换。物理层网络编码只需两个时隙, 比直接网络编码减少一个时隙的时间消耗。

2 基于 MPSK 的物理层网络编码

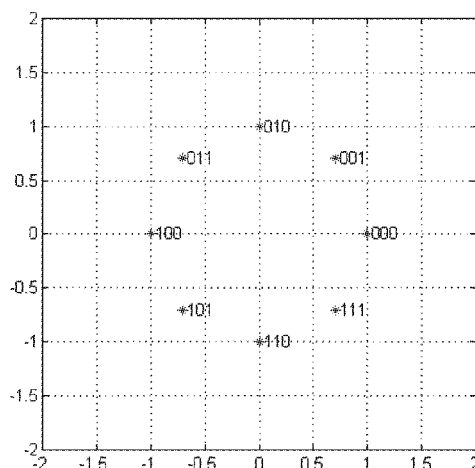
为进一步提高信息传输速率, 提高信道容量, 考虑采用 MPSK ($M \geq 8$) 调制的物理层网络编码。先讨论采用 8PSK 调制的情况, 接着讨论通用的 MPSK 物理层网络编码, 给出 MPSK 调制物理层网络编码的通用算法。

2.1 基于 8PSK 的物理层网络编码

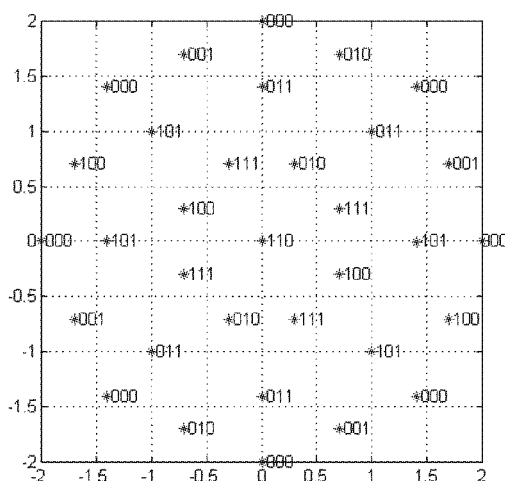
8PSK 调制信号 $s_i(t) = a_i\cos(\omega t) + b_i\sin(\omega t)$ 具有 8 种不同取值, 对应于节点 N_1 和 N_3 不同的发送信息, 其信号星座如图 2(a) 所示。物理层网络编码采用 8PSK 调制/解调, 节点 N_1 和 N_3 在时隙 1 将 8PSK 调制信号 $s_1(t)$ 和 $s_3(t)$ 发送到中继节点 N_2 , 考虑到信号时间同步, 载频和相位同步, 中继节点 N_2 同时收到两个调制信号 $s_1(t)$ 和 $s_3(t)$, 将调制信号在不解调的情况下直接进行加和操作得到和信号 $s_1(t) + s_3(t)$, 和信号星座如图 2(b)。

图 2(b) 中 8PSK 和信号星座图具有 33 个节点,

其中具有多个重合节点。由于和信号比 8PSK 信号的平均载波幅度要大, 如果直接发送 8PSK 和信号, 节点 N_2 将消耗更多的能量。



(a) 8PSK 信号星座图



(b) 两个 8PSK 和信号星座图

图 2 8PSK 信号及和信号星座图

中继节点 N_2 采用星座映射, 将图 2(b) 中 8PSK 和信号星座映射到对应的图 2(a) 中 8PSK 信号星座, 其中和信号星座具有相同信息的节点映射到 8PSK 信号星座中表示同一信息的节点, 中继节点将映射后的 8PSK 星座上的信号调制发送出去。例如 8PSK 和信号星座图中有 4 个节点表示信息 111, 将其映射到 8PSK 信号星座上的 111 节点。节点 N_2 对信息 111 进行 8PSK 调制, 然后发送出去。接收节点 N_1 (或 N_3) 收到调制信号后, 先对信号进行解调得到信息 111, 与节点已有信息进行编码(异或)操作, 得到节点 N_3 (或 N_1) 的信息, 实现节点 N_1 和 N_3 之间的信息互换。

2.2 基于 MPSK 的物理层网络编码

考虑 MPSK 调制 \ 解调,得到 MPSK 信号及其和信号星座图。中继节点 N_2 对收到的两个 MPSK 调制信号 $s_1(t)$ 和 $s_3(t)$ 直接进行加和操作,得到和信号 $s_1(t) + s_3(t)$ 。采用星座映射,将 MPSK 和信号星座图上的节点映射到 MPSK 信号星座图中表示相同信息的节点,实现多对一映射,有效地减小了中继节点信号发射功率,降低能量消耗,提高传输效率。保证信号时间同步,载频和相位同步。下面给出 MPSK 物理层网络编码具体操作(实现框图如图 3 所示):

(1) 节点 N_1 和 N_3 对信息 S_1, S_3 进行 MPSK 调制,将调制信号 $s_1(t)$ 和 $s_3(t)$ 在时隙 1 同时发送到

中继节点 N_2 ;

(2) 中继节点 N_2 同时收到两个 MPSK 调制信号 $s_1(t)$ 和 $s_3(t)$, 直接对调制信号进行加和操作得到和信号 $s_1(t) + s_3(t)$, 根据 MPSK 和信号星座图与 MPSK 信号星座图之间的映射关系,将和信号映射到 MPSK 信号 $s_2(t)$;

(3) 中继节点 N_2 在时隙 2 将 MPSK 信号 $s_2(t)$ 发送到接收节点 N_1 和 N_3 ;

(4) 节点 N_1 (或 N_3) 收到 MPSK 调制信号后进行 MPSK 解调,得到 $S_1 \oplus S_3$ 信息,与已有信息 S_1 (或 S_3) 进行译码(异或)操作,得到节点 N_3 (或 N_1) 的信息 S_3 (或 S_1)。

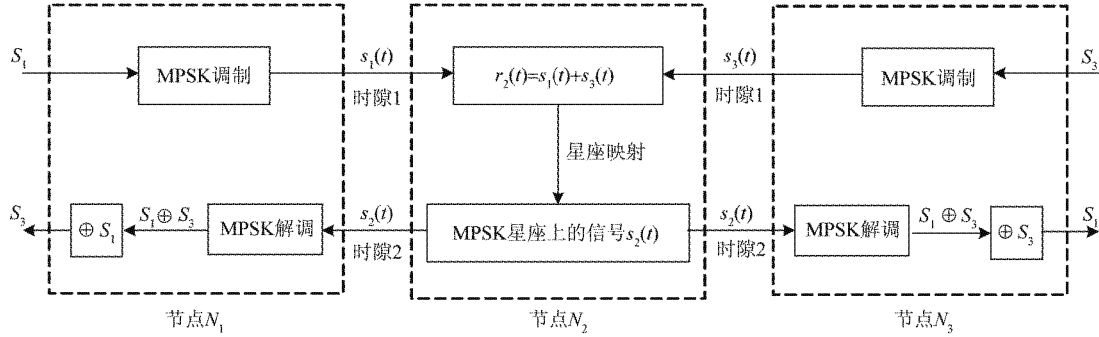


图 3 基于 MPSK 星座映射物理层网络编码实现框图

MPSK 和信号星座与 MPSK 信号星座之间的映射关系:将 MPSK 和信号星座图中具有相同信息的节点映射到 MPSK 信号星座中表示同一信息的节点,存在和信号星座图中多个节点映射到 MPSK 信号星座图中同一个节点的情况。

经过上述操作实现了节点 N_1 和 N_3 之间的信息互换,看出中继节点采用星座映射,将 MPSK 和信号星座映射到 MPSK 调制信号星座上,降低了发射信号的平均载波幅度,减少能量消耗。同时,节点 N_1 和 N_3 在 2 个时隙内完成了信息交换,比 straightforward 网络编码减少了 1 个时隙的时间消耗,采用 MPSK ($M \geq 8$) 信号调制,提高信道容量,进一步提高了信息传输速率。

3 性能分析

3.1 能量消耗

在中继节点进行星座映射,将 MPSK 和信号星座映射到 MPSK 信号星座,将映射后的 MPSK 信号发送出去。对中继节点发送信号所需能量进行分析,说明新的物理层网络编码方法具有更低的能量消耗。中继节点发送一个 MPSK 信号需要的平均能

量如式

$$E_{\text{MPSK}} = E[\|a_j\|^2] = \sum_{j=1}^M \|a_j\|^2 \text{Pr}(j) \quad (1)$$

所示。考虑到 MPSK 星座图中 M 个信号节点等概,平均能量可以表示为

$$E_{\text{MPSK}} = \frac{\sum_{j=1}^M \|a_j\|^2}{M} \quad (2)$$

其中 a_j 为 MPSK 信号幅度,假定 MPSK 调制信号具有单位振幅。表 2 给出当 MPSK 星座图中信号等概时,中继节点发送 MPSK 信号及和信号需要的平均能量。

表 2 信号等概时,中继节点发送 MPSK 信号及和信号需要的平均能量

调制方法	E_{MPSK}	$E_{\text{MPSK和信号}}$
BPSK	1	2
QPSK	1	2
8PSK	1	2
16PSK	1	2
32PSK	1	2
64PSK	1	2
MPSK	1	2

从表 2 看出,中继节点发送 MPSK 和信号需要的能量 E_{MPSK} 和信号是发送 MPSK 信号所需能量的两倍。中继节点采用星座映射,将 MPSK 和信号星座映射到 MPSK 信号星座,中继节点发送 MPSK 调制信号,需要的能量减小到原来的一半,降低了无线网络节点能量消耗。

3.2 信道容量

本节分析物理层网络编码在 MPSK 调制下的信道容量特性。假定节点 N_1, N_3 与中继节点 N_2 之间的信道为加性高斯白噪声 (AWGN) 信道,根据二维星座信道容量的计算公式

$$C = \log_2 M - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E \left\{ \log_2 \sum_{i=1}^M \exp \left(- \frac{|a_j + n - a_i|^2 - |n|^2}{N_0} \right) \right\} \quad (3)$$

分别对 MPSK ($M = 2^n, 1 \leq n \leq 6$) 调制下物理层网络编码的 AWGN 信道容量进行仿真,得到不同信噪比 (SNR) 条件下的信道容量曲线,如图 4 所示。可以看出相同信道条件下,采用相位键控的进制越高,得到信道容量越逼近 Shannon 边界。高进制相位键控具有复杂的信号星座,相应和信号星座图的复杂

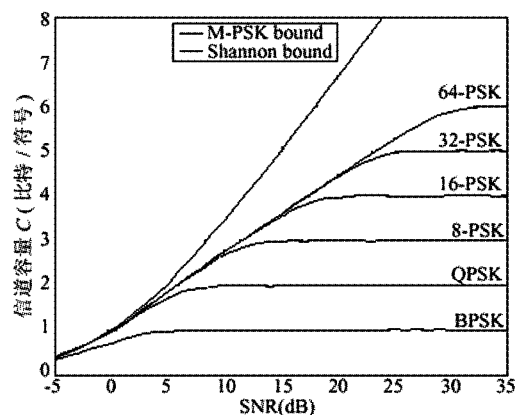


图 4 物理层网络编码在 MPSK 调制下的 AWGN 信道容量

度更高,中继节点 N_2 需要存储星座图之间的映射表就越复杂,需要更大的存储空间,增加了中继节点的数据处理时间。

若信道条件不是很坏,采用较低进制的 MPSK 调制,既能减少中继节点的存储空间,提高处理速度,其传输速率又能接近 Shannon 信道容量,实现物理层网络编码;否则,采用高进制相位键控,以中继节点较高的数据处理要求来弥补信道容量的损失。

4 结 论

本文将物理层网络编码采用的调制方法从 QPSK 推广到 8PSK 以及 MPSK,提出一种新的物理层网络编码方法——星座映射,在中继节点将 MPSK 和信号星座映射到 MPSK 调制信号星座上,给出相位键控调制物理层网络编码的通用方法。仿真结果表明,该方法在中继节点节约了 50% 的能量消耗,提高了信息传输速率。

参考文献

- [1] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow. *IEEE Trans Inform Theory*, 2000, 46(4): 1204-1216
- [2] Wu Y, Chou P A, Kung S Y. Minimum-energy multicast in mobile ad hoc networks using network coding. *IEEE Trans on Communications*, 2005, 53(11): 1906-1918
- [3] Lun D S, Medard M, Ho T, et al. Network coding with a cost criterion. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Information Theory and its Applications, Italy, 2004
- [4] Wu Y, Chou P A, Kung S Y. Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast. Microsoft Technical Report, MSR-TR-2004-78, 2004
- [5] Zhang S, Liew S C, Lam P. Physical-layer network coding. In: Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Los Angeles, USA, 2006. 358-365
- [6] Zhang S, Liew S C, Lam P. On the synchronization of physical-layer network coding. In: Proceedings of the 2006 IEEE Information Theory Workshop, Chengdu, China, 2006. 404-408

Physical-layer network coding based on MPSK in wireless networks

Wang Jing, Liu Xiangyang*, Wang Xinmei

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071)

(* Military Comprehensive Information Network Teaching Office, Xi'an Communication College, Xi'an 710106)

Abstract

This paper presents a new physical-layer network coding (PNC) method, which extends the modulation method in PNC to 8 phase-shift keying (8PSK) and M-ary phase-shift keying (MPSK). The method adopts constellation mapping in the relay node, and the constellation of MPSK sum-signals should be mapped into the original MPSK constellation. To obtain the other receiver's information and implement information exchange, each receiver demodulates the corresponding MPSK signal obtained and decodes (XOR) the bit information from the demodulator with its own. The simulation results show that the new method is effective, and compared with the original PNC method, this method can reduce 50% energy consumption in the relay node, and improve the information transmission rate.

Key words: network coding, physical-layer, information exchange, M-ary phase-shift keying (MPSK)