

# 联合子载波抑制-机会网络编码的 OFDM 数据广播方法

沈先丽 许 魁 韩 序 徐友云

(解放军理工大学通信工程学院, 南京, 210007)

**摘要:** 正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术通过采用多个子载波在不同的子带上传输信息来有效对抗频率选择性衰落。但不同子载波信道质量不同,其中信道质量较差的子载波会产生较大的误码率,从而导致整个系统性能下降。将信道质量较差的子载波抑制不用即可解决该问题。本文提出了一种适用于 OFDM 数据广播系统的联合子载波抑制-机会网络编码方法(Joint subcarriers suppression and opportunistic network coding, JSSONC),即将子载波抑制技术与网络编码(Network coding, NC)技术联合使用。基站抑制信道质量较差的子载波,仅采用信道质量较好的子载波进行数据包的广播与重传。在此基础上,结合机会网络编码,进一步减少重传数据包数量。仿真结果表明,与传统 OFDM 广播系统相比,本文提出的 JSSONC 方法降低了每一个数据包平均传输次数(Average transmission times of every data package, ATT-E),从而大大提高了系统传输效率。

**关键词:** OFDM; 广播系统; 子载波抑制; 机会网络编码

**中图分类号:** TN911.7      **文献标志码:** A

## Joint Subcarriers Suppression and Opportunistic Network Coding for OFDM Data Broadcasting

Shen Xianli, Xu Kui, Han Xu, Xu Youyun

(College of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, 210007, China)

**Abstract:** Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) could efficiently tackle the problem of frequency-selective fading by adopting multiple subcarriers to be transmitted upon different subbands. Subcarriers with weak channel qualities suffer severe symbol errors, which limits the overall system performance. Suppressing subcarriers with bad channel qualities would solve the problem. Here, a joint subcarriers suppression and opportunistic network coding (JSSONC) scheme is proposed for OFDM data broadcasting systems, where subcarriers suppression technique is combined with network coding (NC) technique. By using JSSONC, the base station suppresses the subcarriers being in bad channel conditions. Consequently, retransmission packets used to recover lost packets are produced by adopting network coding to reduce further the number of transmissions. Simulation results show that the proposed JSSONC in OFDM data broadcasting systems reduces the average transmission times of every data package (ATT-E), compared with the traditional OFDM broadcasting systems, thus improving the system transmission efficiency.

**基金项目:** 国家自然科学基金重大研究计划(91438115)资助项目; 中国博士后基金(2015T81079)特别资助项目; 国家自然科学基金(61371123, 61301165)资助项目; 江苏省自然科学基金(BK2011002, BK2012055)资助项目; 国家博士后科学基金(2014M552612)资助项目; 江苏省博士后科学基金(1401178C)资助项目。

**收稿日期:** 2015-07-30; **修订日期:** 2015-12-16

**Key words:** orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); broadcasting system; subcarriers suppression; opportunistic network coding

## 引言

随着移动互联网的蓬勃发展,移动通信对高速数据传输的需求越来越高。作为宽带移动通信需求最基本的支撑,频谱资源稀缺问题愈加突出和严重。因此,如何在频谱资源受限的条件下,进一步提高移动通信系统传输效率是下一代移动通信系统设计中亟需解决的重要问题之一。广播通信是指基站向多个接收端发送相同数据的点到多点业务<sup>[1]</sup>,是一种传输大量数据业务的有效方式。目前,广播通信已成为移动通信研究的热点之一。在广播通信系统中要求每一个接收端都能正确接收来自基站的所有数据包。由于无线链路的衰落特性,接收端往往无法正确接收全部数据包。传统广播方案采取的做法是重传所有丢包,直到全部接收端都能正确接收。这种方式很明显的缺点是需要重传大量数据包,能量和时频资源开销很大。

网络编码(Network coding, NC)<sup>[2]</sup>于 2000 年被提出,通过对多路信息进行异或处理,有效提高了有线通信网络吞吐量性能。随着研究不断深入,NC 也在提高无线网络性能方面发挥重要作用<sup>[3-5]</sup>。网络编码广播技术<sup>[6]</sup>是针对传统广播方案的缺点而改进得到的。考虑在数据包重传阶段根据不同接收端正确接收数据包的差异,基站在接收端能够利用边信息正确解码的前提下,对需要重传的数据包进行合并后重传。网络编码广播技术使得需要重传数据包数量大大降低,从而减少了资源开销,提高了系统传输有效性<sup>[7,8]</sup>。正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术,由于其具有高频谱利用率以及较好的抗多径衰落能力等特点,已经成为第四代移动通信标志性的物理层传输承载技术<sup>[9]</sup>。为了进一步提高 OFDM 系统的传输可靠性,文献[10]提出两种子载波抑制方法。通过放弃使用信道条件差的子载波而仅使用信道条件好的子载波来进行信息传输,从而大幅提高系统误比特率性能。

针对 OFDM 广播系统的技术特点,本文提出了一种联合子载波抑制-机会网络编码(Joint subcarriers suppression and opportunistic network coding, JSSONC)的 OFDM 数据广播方法。基站根据无线信道随机衰落特性,选择性地抑制信道质量较差的子载波,仅采用信道质量较好的子载波进行数据包的广播与重传。在此基础上,利用机会网络编码重传协议进一步减少重传数据包数量。仿真结果表明,与传统 OFDM 广播系统<sup>[11,12]</sup>相比,本文提出的 JSSONC 大大降低了每一个数据包平均传输次数,大幅提高了系统传输效率。

## 1 系统模型

基于 TDMA 的广播系统由一个基站 S 和 U 个接收端构成,基站 S 需要把 N 个数据包依次传输给 U 个接收端,若接收端发现丢包则需要重传,直至所有接收节点正确接收到所有数据包,如图 1 所示。所有节点均配备单根天线并工作在半双工模式;假设 S 知道 S 到每一个接收端之间的信道状态信息;系统采用 OFDM 传输方式,子载波个数用 K 表示,子载波调制方式为 BPSK,基站到接收端的信道为多径瑞利衰落信道,用向量  $\mathbf{h}_m$  表示,即

$$\mathbf{h}_m = [h_m[0], h_m[1], \dots, h_m[LL-1]]^T \quad (1)$$

式中:  $h_m[l] \sim CN(0, \sigma_l^2)$ ,  $l=0, 1, \dots, LL-1$ , LL 表示路径数;  $m \in \{1, \dots, U\}$ 。基站到接收端的信道独立同分

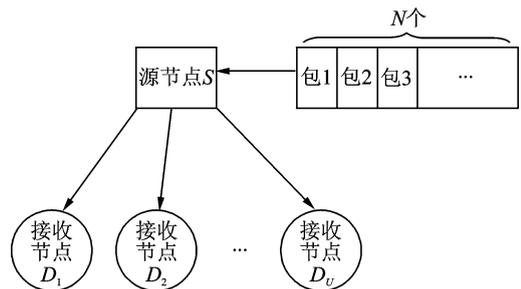


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

布,在第  $k$  个子载波上的频域信道为  $H_m[k]$ ,即

$$H_m[k] = \sum_{l=0}^{L-1} h_m[l] e^{-2j\pi k l} \quad (2)$$

数据包长度用  $L$  表示,子载波个数用  $Q$  表示,则一个数据包首次广播中需要占用的 OFDM 符号数为

$$n_0 = \lceil L/Q \rceil \quad (3)$$

$N$  个数据包首次广播中需要占用的 OFDM 符号数为

$$n = N \times n_0 \quad (4)$$

整个传输过程分为两个阶段:首次广播阶段和重传阶段。

首次广播阶段。该阶段根据  $N, L$  和未被抑制的子载波个数  $Q$  之间的关系可以分成若干个时隙,一个 OFDM 符号占用一个时隙。在每一个时隙中,首先,  $S$  在第  $k$  个子载波上需要发送信息  $A^{[k]}$ ;然后,信息  $A^{[k]}$  经过 BPSK 调制后可以写成  $X^{[k]}$ ;最后,  $S$  把信息  $X^{[k]}$  广播给所有接收端。第  $m$  个接收端接收到的信息可以表示为

$$Y_m^{[k]} = H_m^{[k]} X^{[k]} + N_m^{[k]} \quad (5)$$

式中:  $H_m^{[k]}$  表示从  $S$  到  $D_m$  的多径瑞利衰落信道在第  $k$  个子载波上的增益,  $m \in \{1, \dots, U\}, k \in \{1, \dots, K\}$ ,且  $H_m^{[k]}$  在一个时隙内保持不变;  $N_m^{[k]}$  表示加性高斯白噪声。  $Y_m^{[k]}$  均衡后的结果用  $M_m^{[k]}$  表示,即有

$$M_m^{[k]} = Y_m^{[k]} / H_m^{[k]} \quad (6)$$

最后各接收端根据如下方法解调接收到的信息,即

$$B_m^{[k]} = \begin{cases} 0 & M_m^{[k]} < 0 \\ 1 & M_m^{[k]} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

重传阶段。该阶段根据需要重传数据包的个数、 $L$  和  $Q$  之间的关系可以分成若干个时隙,一个 OFDM 符号占用一个时隙。在一个时隙内,信道状态保持不变。该阶段各接收端首先判断各数据包是否被正确接收,从而得到错误矩阵;然后采用机会网络编码,根据错误矩阵得到编码矩阵;最后重传合并后的数据包,更新错误矩阵。不断循环,直至错误矩阵为零矩阵(即所有数据包都已被正确接收到)。

## 2 子载波抑制技术应用和机会网络编码

### 2.1 子载波抑制技术在 OFDM 数据广播系统中的应用

无线信道的多径传输特性会导致频率选择性衰落。在 OFDM 系统中,信道的频率选择性衰落会造成不同子载波具有不同的信道增益。子载波抑制仅利用信道条件好的子载波传输信息,而信道条件差的子载波放弃不用。用  $\lambda$  表示抑制门限,当子载波的信道增益高于  $\lambda$  时,定义该子载波为“活跃子载波”;反之,当子载波的信道增益低于  $\lambda$  时,定义该子载波为“抑制子载波”。每一个子载波是否是活跃子载波可以用子载波状态  $F_m^{[k]}$  表示为

$$F_m^{[k]} = \begin{cases} 1 & |\hat{H}_m^{[k]}| \geq \lambda \\ 0 & |\hat{H}_m^{[k]}| < \lambda \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $H_m^{[k]}$  表示从  $S$  到  $D_m$  的多径瑞利衰落信道在第  $k$  个子载波上的增益;  $\hat{H}_m^{[k]}$  表示  $H_m^{[k]}$  的估计值;  $|\hat{H}_m^{[k]}|$  表示  $H_m^{[k]}$  的估计值的模值。“1”表示该子载波是活跃子载波;“0”表示该子载波是抑制子载波。在子载波抑制之前,  $S$  需要确定抑制门限  $\lambda$ 。  $S$  首先确定使用子载波的个数  $Q, Q$  为常数。根据常数  $Q$  来确定临时抑制门限,即  $S$  在所有  $K$  个子载波中结合各个接收节点综合考虑,选择信道条件较好的  $Q$  个子载波来传输信息( $0 < Q \leq K$ ),把第  $Q$  好的信道增益的模制  $|h^{[Q]}|$  作为临时抑制门限。具体方法如下:首先,找出每一个子载波在到各个接收端之间的信道增益最小值为

$$h^{[k]} = \min \{ |\hat{H}_1^{[k]}|, |\hat{H}_2^{[k]}|, \dots, |\hat{H}_U^{[k]}| \} \quad (9)$$

再将这  $K$  个最小值按降序排列:定义集合  $h = \{h^{[1]}, h^{[2]}, \dots, h^{[K]}\}$ ,再定义集合  $h' = \{h'^{[1]}, h'^{[2]}, \dots, h'^{[K]}\}$  使得  $h'^{[1]} \geq h'^{[2]} \geq \dots \geq h'^{[K]}$ ,最后,选择第  $Q$  个信道增益的模值作为抑制门限,即  $\lambda = |h'^{[Q]}|$ 。故

$$F_m^{[k]} = \begin{cases} 1 & |\hat{H}_m^{[k]}| \geq |h'^{[Q]}| \\ 0 & |\hat{H}_m^{[k]}| < |h'^{[Q]}| \end{cases} \quad (10)$$

假设每一个接收端都完全已知各个基站的子载波状态。只有在基站到每一个接收端之间都是“活跃子载波”时,该子载波才被基站用来传输信息,定义为“使用子载波”。系统仅使用“使用子载波”来传输信息而不使用被抑制的子载波,如图 2 所示。因此,第  $k$  个子载波是否被基站使用可以用状态  $F^{[k]}$  表示,即有

$$F^{[k]} = F_1^{[k]} \times F_2^{[k]} \times \dots \times F_U^{[k]} \quad (11)$$

式中:若  $F^{[k]} = 1$ ,则该子载波是“使用的子载波”,被基站使用;若  $F^{[k]} = 0$ ,则该子载波被放弃不用。使用  $H_{sm}^{[k]}$  表示  $S$  到  $D_m$  的多径瑞利衰落信道使用子载波在第  $k$  个子载波上的增益,即

$$H_{sm}^{[k]} = F^{[k]} \times H_m^{[k]} \quad (12)$$

子载波抑制技术贯穿整个传输过程,应用在首次广播阶段和重传阶段。

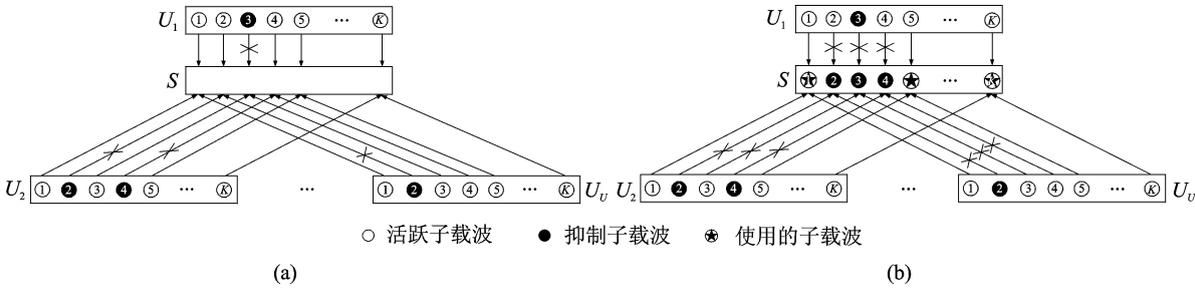


图 2 子载波抑制方法  
Fig. 2 Subcarriers suppression scheme

### 2.2 机会网络编码

重传阶段,在应用子载波抑制的基础上,利用机会网络编码方法完成数据包的重传。首先,各个接收端判断每一个数据包是否被正确接收,只要数据包中的一个比特发生传输错误,则判定该数据包丢包。数据包被正确接收用“0”表示,丢包用“1”表示,从而得到一个  $U \times N$  的错误矩阵  $E\_M0$ ,即

$$E\_M0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

然后,让在大多数接收端都发生丢包的数据包优先参与编码合并从而得到网络编码重传数据包;最后,只重传网络编码重传数据包。

编码合并具体分为 4 个步骤。

(1)将原错误矩阵按列求和,即

$$SUM = [a \quad b \quad \dots \quad c] \quad (14)$$

再降序排列

$$SUM' = [a' \quad b' \quad \dots \quad c'] \quad (15)$$

式中:  $a' > b' > \dots > c'$ 。根据  $SUM'$  对应得到新的错误矩阵

$$\mathbf{E}_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

(2) 根据文献[11]中的编码方法生成传统编码矩阵  $\mathbf{Coding\_List0}$ ,  $\mathbf{Coding\_List0}$  为若干行  $N$  列的矩阵。

(3) 取传统编码矩阵的第一行, 得到最终的编码矩阵

$$\mathbf{Coding\_List} = \mathbf{Coding\_List0}(1, :) \quad (17)$$

(4) 根据最终的编码矩阵将发生丢包的数据包异或, 完成合并, 最后得到网络编码重传数据包。

例如, 假设有原错误矩阵  $\mathbf{E}_m0$

$$\mathbf{E}_m0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$U=4, N=5$ ; 将矩阵  $\mathbf{E}_m0$  按列求和

$$\mathbf{Sum} = [1 \quad 2 \quad 1 \quad 2 \quad 3] \quad (19)$$

将错误矩阵按列求和后降序排列得到新的错误矩阵

$$\mathbf{E}_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

根据文献[11]中的编码方法得到原始编码矩阵

$$\mathbf{coding\_list0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

取原始编码矩阵的第一行作为最终应用的编码矩阵

$$\mathbf{coding\_list} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad (22)$$

根据编码矩阵将发生丢包的数据包异或, 然后重传, 每一次只重传一个网络编码重传数据包。

因为在大多数接收端发生丢包的数据包优先参与了重传, 故每一次重传的数据包能够最大程度地减少错误矩阵中“1”的个数, 从而能够最大程度纠正丢包。接收端根据信道矩阵、原错误矩阵和编码矩阵不断更新原错误矩阵。不断循环上述过程直至原错误矩阵更新为零矩阵, 所有丢包都被正确接收。

### 3 仿真结果

本节给出包含  $U$  个接收端的 JSSONC 方法在每一个数据包平均传输次数 (Average transmission times of every data package, ATT-E) 方面仿真结果。基站和接收端的发送功率设为 1, 子载波个数  $K=64$ , 循环前缀长度为 16, 无线多径信道建模为 4 径独立同分布的瑞利信道。在整个仿真过程中, 使用子载波的个数用  $Q$  表示。数据包个数  $N=100$ , 数据包长度用  $L$  表示。

图 3, 4 为在不同信噪比情况下的 ATT-E 仿真结果。接收端个数  $U=10, L=1000$  比特。由图 3 可以看出, ATT-E 随信噪比增加而减少; 本文提出的 JSSONC 方法的 ATT-E 性能显著优于传统 OFDM 广播系统<sup>[11,12]</sup>。且抑制子载波个数越多, 使用的子载波的整体信道质量越好, ATT-E 越少, 系统传输效率越高。由图 4 可以看出, 本文提出的 JSSONC 方法的 ATT-E 随着数据包长度变短而减小。

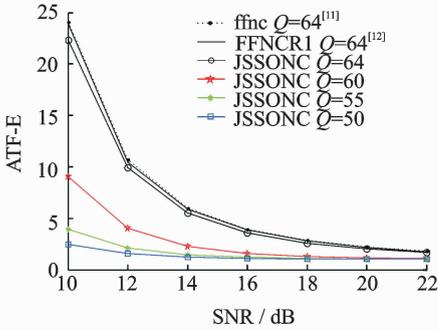


图3 随信噪比变化的 ATT-E

Fig. 3 ATT-E varying with different SNR

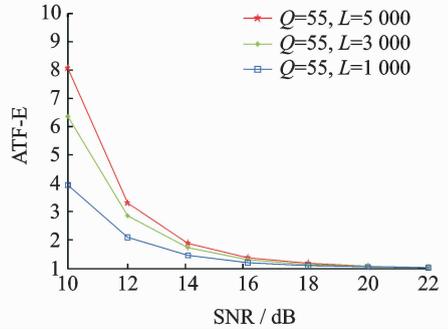


图4 JSSONC 随信噪比变化的 ATT-E

Fig. 4 ATT-E of JSSONC varying with different SNR

图5为ATT-E随数据包长度变化而变化的仿真情况,  $U=10$ ,  $\text{SNR}=10$  dB, 数据包长度越长, 发生丢包的概率越大, ATT-E 越大。本文提出的 JSSONC 方法显著优于传统 OFDM 广播系统, 且抑制子载波个数越多, ATT-E 越小, 系统传输效率越高。

图6为ATT-E随着接收端个数增加的变化趋势的仿真结果。  $\text{SNR}=10$  dB,  $L=1000$  比特。由图6可知, ATT-E 随着  $U$  增加而增加。  $U$  越大, 错误矩阵行数越多, 故重传次数越大。本文提出的 JSSONC 方法 ATT-E 远小于传统 OFDM 广播系统中 ATT-E, 且抑制子载波个数越多, ATT-E 越小, 系统传输效率越高。并且在抑制子载波个数较多时, 使用的子载波的整体信道质量较好, 丢包的概率较低,  $U$  的增大不会导致重传次数的增多。故在抑制子载波个数较多时, ATT-E 几乎不再随着  $U$  的增加而变化, 大幅提高了系统传输效率。

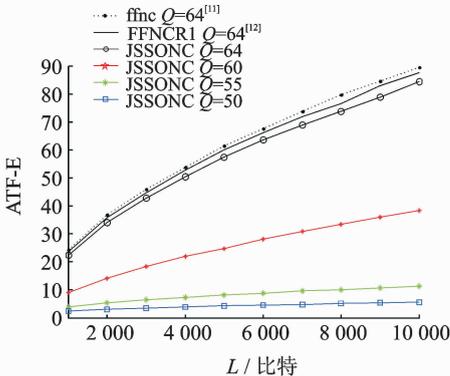


图5 随数据包长度变化的 ATT-E

Fig. 5 ATT-E as different length of data package

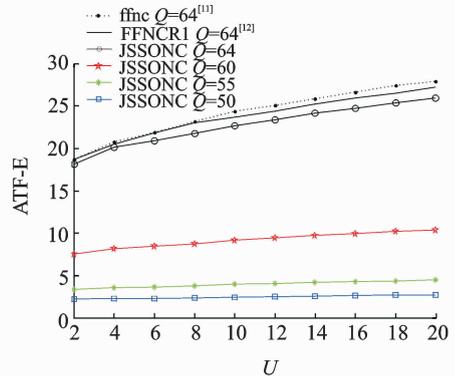


图6 随接收端个数变化的 ATT-E

Fig. 6 ATT-E as different number of users

## 4 结束语

本文提出了一种联合子载波抑制-机会网络编码的 OFDM 数据广播方法。基站根据无线信道随机衰落特性, 选择性地抑制信道质量较差的子载波, 仅采用信道质量较好的子载波进行数据包的广播与重传。在此基础上, 利用机会网络编码重传协议进一步减少重传数据包数量。计算机仿真结果证明了本文提出的 JSSONC 方法的优越性。JSSONC 降低每一个数据包平均传输次数, 且抑制子载波个数越多, 每一个数据包平均传输次数越少; 在抑制子载波个数较多的情况下, 每一个数据包平均传输次数几乎不

随接收端个数增多而增多。与传统 OFDM 广播系统相比,本文提出的 JSSONC 方法大幅提高了系统传输效率。

### 参考文献:

- [1] Shin-Lin Shieh, Himadri Subrah Saha, Rakhi Roy. Network coding design for broadcast service of low cost receiver [C] // 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Las Vegas, NV: IEEE, 2013: 1-5.
- [2] Ahlswede R, Cai N, Li S-Y, R, et al. Network information flow [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [3] Wang Xun, Xu Ying, Feng Zhiyong. Physical-layer network coding in OFDM system: Analysis and performance [C] // 2012 7th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM). Kunming: IEEE, 2012: 139-143.
- [4] 钟新毅,徐友云,许魁,等. 双向中继信道的模拟网络编码最优功率分配 [J]. *信号处理*, 2014, 30(8): 867-873.  
Zhong Xinyi, Xu Youyun, Xu Kui, et al. A optimal power allocation of analog network coding for two-way relay channel [J]. *Journal of Signal Processing*, 2014, 30(8): 867-873.
- [5] 梁文文,田华,徐友云,等. 非对称双向多中继系统机会式网络编码中断概率分析 [J]. *数据采集与处理*, 2013, 28(1): 29-33.  
Liang Wenwen, Tian Hua, Xu Youyun, et al. Outage probability analysis of opportunistic network coding on asymmetrical bi-directional multi-relay system [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2013, 28(1): 29-33.
- [6] Laneman J N, Wornell G W. Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks [C] // 2000 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC). Chicago, IL: IEEE, 2000: 7-12.
- [7] Zhang Zhang, Lü Tiejun, Su Xin, et al. Dual XOR in the air: A network coding based retransmission scheme for wireless broadcasting [C] // 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kyoto: IEEE, 2011: 1-6.
- [8] Chao C, Chou C, Wei H. Pseudo random network coding design for IEEE 802.16m enhanced multicast and broadcast service [C] // IEEE Veh Technol Conf(VTC). Taipei, China: IEEE, 2010: 1-5.
- [9] Doufexi A, Armour S. Design considerations and physical layer performance results for a 4G OFDM system employing dynamic subcarrier allocation [C] // 2005 IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Berlin: IEEE, 2005: 357-361.
- [10] Bartoli G, Fantacci R, Marabissi D, et al. Subcarriers suppression methods for OFDM systems with decode-and-forward network coding [J]. *IEEE Trans Wireless Communication*, 2013, 12(12): 6034-6042.
- [11] Xiao Xiao, Yang Luming, Wang Weiping, et al. A wireless broadcasting retransmission approach based on network coding [C] // 2008 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications (ICCS). Shanghai: IEEE, 2008: 782-786.
- [12] Lu Lu, Ming Xiao, Mikael Skoglund, et al. Efficient network coding for wireless broadcasting [C] // 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Sydney, Australia: IEEE, 2010: 1-6.

### 作者简介:



沈先丽(1987-),女,硕士研究生,研究方向:移动通信, E-mail: shenxianli@126.com。



许魁(1982-)男,副教授,硕士生导师,研究方向:无线传输技术、网络编码, E-mail: lgdxxukui@126.com。



韩序(1990-),男,硕士生,研究方向:为移动通信, E-mail: hanxu23@126.com。



徐友云(1966-),男,教授,博士生导师,研究方向:移动通信、认知无线电和网络编码等, E-mail: yyxu@vip.sina.com。

