

用户均匀分布的基于 RLNC 无线广播系统性能分析

孙小丽 许 魁 谢 威 徐友云

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏南京 210007)

摘 要: 本文分析了基于随机线性网络编码(random linear network coding, RLNC)的无线广播系统的性能。该系统的一个源节点需要将 N 个信息包广播给以其为圆心的多个均匀分布用户。通过利用随机几何分析我们推导了该系统中的近似平均传输次数和平均成功译码用户百分比。仿真结果表明, 理论近似推导和实际仿真结果十分接近以及 RLNC 方案相比 LT 码(Luby Transform codes)方案有很大的性能提升。同时, 一个用户接收到 N 个 RLNC 编码包即可以极高概率恢复出源信息包。

关键词: 无线广播系统; 随机线性网络编码; 擦除信道; 性能分析

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2016.05.002

On the Performance of RLNC Based Wireless Broadcasting with Uniformly Distributed Users

SUN Xiao-li XU Kui XIE Wei XU You-yun

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

Abstract: In this paper, we analyze the performances of the random linear network coding (RLNC) based wireless broadcasting system, where a source wants to broadcast N packets to a large number of users with uniform distribution. By resorting to stochastic geometry analysis, we deduce the approximate average number of transmissions and the average percent of successful decoding users in the RLNC based wireless broadcasting system. Simulation results are given to demonstrate the accuracy of our theoretical analyses and the performance improvement of using RLNC scheme when compared with LT codes (Luby Transform codes). Meanwhile, we show that a user can recover all the original packets with high probability by receiving N out of all the transmitted RLNC combined packets.

Key words: wireless broadcasting system; random linear network coding; erasure channel; performance analysis

1 引言

近年来,新型多媒体业务如网络电视、视频会议、远程教育等已经成为互联网发展的重要方向,这些业务都需要一对多形式的传送。因此无线广播传输技术已经成为值得研究者特别关注的重要问题。

然而无线链路的不可靠性以及不同用户之间

的链路质量各不相同使得数据包在传输过程中更加容易丢失。为保证无线链路的可靠数据传输,一般的解决方法是采用重传(Automatic Repeat re-Quest, ARQ)技术。使用 ARQ,当接收者正确接收到数据包时给源端反馈 ACKs,当接收者错误接收数据包时给源端反馈 NACKs。如果源端接收到 NACKs 或者在预定的时间里没有收到 ACKs,它将会重传这些数据包。然而,随着网络规模的不断扩大,反馈

收稿日期: 2015-09-28; 修回日期: 2015-12-02

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91438115); 国家自然科学基金项目(61371123, 61301165); 中国博士后科学基金特别资助项目(2015T81079); 中国博士后科学基金项目(2014M552612); 江苏省博士后科学基金项目(1401178C); 总装预研项目基金(9140C020306130C02007)资助

信息产生的负载将急剧增大,使用 ARQ 进行无线广播会造成巨大的时延,这是不切合实际的。尤其是对于用户数量和用户位置随着时间变化剧烈的高动态网络更是如此。因此,我们需要一种无需反馈的无线广播解决方案。

2000 年, Ahlswede 等人提出了网络编码的概念,网络编码的核心思想是让中间节点在转发之前对数据包进行编码结合,区别于传统存储转发的传输模式,通过提高单次传输的信息量,减少数据包发送次数,进而提高网络的整体性能。随着研究的逐步推进,网络编码已被广泛地应用到包括提高网络吞吐量、保障链路的安全性、可靠性及能量效率等各个方面^[1]。近年来,有研究者指出通过网络编码对丢失的广播包进行编码重传,可以有效提升无线广播的吞吐量和可靠性^[2]。其核心思想是将不同用户的丢失包进行异或组合并重传,使尽可能多的用户能从单次重传的编码包中恢复出各自所需的丢失包。研究表明基于网络编码的 ARQ 方案比无网络编码的 ARQ 方案性能更好,尤其是对于信道条件好和用户数量少的情况。然而基于网络编码的重传策略仍然需要大量用户的反馈信息。

为使得网络编码具有实际可用性, Li 等人提出了线性网络编码的概念,研究结果证实节点进行线性网络编码运算,具有可行性,能够达到最大流传输理论极限^[3-4],它能够为无线广播的可靠性和信道利用率提供良好的解决方法。有两种主要的线性网络编码方法:确定性网络编码(deterministic network coding, DNC)^[5]和随机线性网络编码(random linear network coding, RLNC)^[7-8]。DNC 从一个小的有限域里选择编码系数,系数选择取决于用户已接收到的数据包。尽管 DNC 有低译码时延的优势^[6],但是仍需要大量的反馈。而 RLNC 从大的有限域里选择编码系数,可以高概率产生相互独立的编码包。

对于不需确切用户反馈信息的广播信道,无速率码(Rateless codes)^[9]已经被证明是十分有效的编码方式,顾名思义,无速率码即一种码率不受约束限制的编码,又被形象地称为喷泉码(Fountain codes),它可以自动适应任何信道条件而且不需反馈信道。无速率码可以产生无限个编码包,用户只要成功接收到足够数量的编码包,无论接收到的是

哪些,便可成功译出源信息包。Luby 在 2002 年提出的 LT 码(Luby Transform codes)^[10]是第一种实用的无速率码,它采用随机编码的思想,可以在源端产生无限个编码包直到用户接收到足够的编码包来重构源文件。LT 码在擦除信道上的良好性能使它在很多领域都有很好的应用前景。

最近 RLNC 被应用于各个方面的研究,用于提高网络吞吐量、能量利用效率^[11]。RLNC 因其允许在中间节点预编码进而简单的扩展到整个网络而更受欢迎^[12],但喷泉码仅仅适用于端到端编码。在无速率广播场景下使用 RLNC,源端持续发送编码包直到所有的用户接收到 N 个线性独立的编码包,从而能够成功译出 N 个源信息包。

文献[13]提出一种基于随机线性网络编码的无线广播重传方案,该方案中源端根据更新的反馈矩阵 T 将丢失的数据包进行编码重传。接着当用户收到足够多的编码包时就可以通过高斯消元法译出丢失的数据包。但是这个策略仍然是基于 ARQ 的。在很多文献中,为了方便起见,不同用户的擦除概率往往假定是一样的^[14],但这和实际情况并不相符。文献[15]获得了一定比例的用户无法正确译码的概率。在实际的无线广播系统中,时延和传输效率性能更为重要。因此我们推导了近似的平均传输次数和平均译码用户百分比。

本文我们对基于 RLNC 的用户擦除信道质量各不相同的无线广播系统做了性能分析。由于不需要用户到源端的反馈,该系统反馈信息造成的负载大大的减小。在任何时间间隔内用户成功接收一个数据包的概率随着离源端的距离 r 的增大而减小。下面详细介绍我们的贡献:首先对基于 RLNC 的一个源,大量均匀分布用户的无线广播系统的平均传输次数和平均译码用户百分比(当源端发送的编码包数量固定时)进行了理论分析。接着在上述分析的基础上我们利用随机几何理论推导出了近似的平均传输次数和平均译码用户百分比。最后通过仿真结果证明了理论分析的准确性以及 RLNC 编码方案比 LT 码的性能提升。

本文以下部分首先给出基于 RLNC 用户擦除信道质量各不相同的无线广播系统模型;然后详细推导了近似的平均传输次数和平均译码用户百分比;接下来给出计算机仿真结果并进行对比;最后得出结论。

2 系统模型

我们考虑一个包含一个源和 K 个用户的无线广播系统。定义 S 为源节点, U^i 为第 i 个用户, 其中 $i \in \{1, 2, \dots, K\}$ 。源端要通过无线信道发送一个文件给所有的用户, 该文件被分割成 N 个信息包, $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 信道建模为独立的广播包擦除信道。不失一般性, 我们假定信息包有同样的长度。 S 发送的每一个数据包都是由 N 个源信息包线性网络编码而成, 编码系数来自 $F(q)$ (有限域 q)。

假设用户以密度 ρ (每平方米所含的用户数) 均匀分布在 S 的覆盖范围内, 半径为 R (如图 1)。若 K 是足够大, 则用户密度和用户数有这样一个关系:

$$\rho = \frac{K}{\pi R^2}。S \text{ 想要通过合适的网络编码广播 } N \text{ 个信息包, 且用户不向源端提供反馈。我们要获得基于随机线性网络编码方案的平均传输次数和平均成功译码用户百分比。对确定的发送功率 } P, \text{ 比特速率 } R_0, \text{ 系统带宽 } W, \text{ 噪声功率谱密度 } \frac{N_0}{2}, \text{ 块衰落因子 } \mu \text{ 和路径衰减指数 } \alpha, \text{ 在任何时间间隔内一个包经过 } S \text{ 到用户 (离 } S \text{ 的距离为 } r) \text{ 的擦除信道的擦除概率如下}^{[16]}:$$

$$p(r) = 1 - e^{-\frac{2R_0}{(2W^{-1})N_0W} \mu r^{-\alpha P}} \quad (1)$$

对每次传输, 用户可能正确接收或者不能接收到发送的数据包, 建模成等式(1)。如果包被擦除, 它将被丢弃。否则, 该包假定被正确接收。

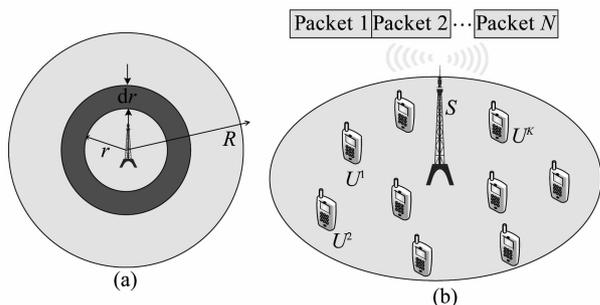


图1 系统模型

Fig. 1 System model

3 随机线性网络编码与广播性能分析

3.1 随机线性网络编码

无速率码是众所周知的解决擦除信道上可靠

广播问题的方法。在传统的喷泉码方案中, 源信息包通过二进制有限域 (或者说高斯域 F_2) 上的编码系数结合^[17]。在随机线性网络编码方案中, 我们考虑 N 个具有相同长度的信息包 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 需要被传送。 S 端通过 RLNC 将所有源信息包进行编码, 产生一个新的编码包: $y_i = \sum_{j=1}^N g_{ij} x_j$, 其中编码系数 $g_{ij} (1 \leq j \leq N)$ 是从有限域 F_q 中随机选择。换言之, 每个编码包都是 N 个源信息包的线性组合, N 个编码系数用一个 $1 \times N$ 的向量表示, 这个向量称为该编码包的编码向量。当一个编码包被广播的时候, 它的编码向量将会放在包头一起广播。因此一个编码包由 $l = h + n + Ng$ 个比特组成, 其中 h 表示包头的比特数, n 是 N 个源数据包线性结合后的比特数, $g = \log_2 q$ 是每个源信息包随机选择的编码系数的比特数。显而易见的是 RLNC 招致了额外的包头 (包含编码系数)。然而, 当源信息包的长度相对大时, 额外的负载是可以接受的。故随机线性码当 N 相对小且源信息包长度相对大时有更小的通信负载, LT 码当 N 非常大时计算才更有效。

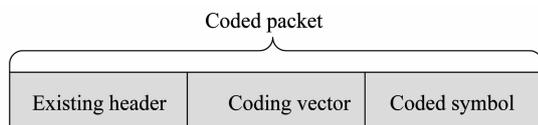


图2 编码包结构

Fig. 2 Structure of the encoded packet

对 U^i , 我们用 M^i 代表它所接收到的编码包数。首先将编码包中的编码向量摘出, 把 M^i 个编码向量放在一起组成一个 $M^i \times N$ 的矩阵 C^i , 我们称 C^i 为 U^i 的编码系数矩阵。 C, Y, X 三者之间的关系可表示为: $Y = CX$, 其中 $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$ 。在随机线性网络编码中, 高斯消元法被广泛使用进行译码计算, 如下所示:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{M1} & \cdots & g_{MN} \end{pmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} \quad (2)$$

如果 U^i 的编码系数矩阵 C^i 的秩是 N , 则 U^i 可以译出源信息包, 我们称它能成功译码, 否则称其不能成功译码。

使用随机线性编码的参数^[18], 用户接收到任何

N 个编码包就能成功译出源信息包 (C^i 的秩为 N)

的概率等于 $\left(1 - \frac{1}{q^N}\right) \left(1 - \frac{1}{q^{N-1}}\right) \cdots \left(1 - \frac{1}{q}\right)$, 下界是

$\left(1 - \frac{1}{q-1}\right)$ 。因此, 对于大的有限域 $F_q (q \geq 8)$, 本文

仿真采用, $q=8$ 。当用户接收到 N 个以上编码包时便足以高概率的译出源信息包。故我们假定在 RLNC 方案中, 源端持续发送编码包直到所有用户成功接收到至少 N 个线性编码包。

3.2 RLNC 广播性能分析

根据上文假定, S 发送 $t \geq N$ 个编码包时, 用户接收到 N 个编码包便可成功译出源信息包。因此离 S 的距离为 r 的用户能够成功译出源信息包的概率计算公式如下 (其中 $p(r)$ 由式(1)计算得到):

$$P(r) = \sum_{\tau=N}^t \binom{\tau-1}{N-1} (p(r))^{\tau-N} (1-p(r))^N \quad (3)$$

用随机变量 CI 表示在所有用户都能够成功译出源信息包的前提下源端需要的总的发送次数; 用 f 表示当源端发送的编码包数 t 固定时, 能够译出源信息包的用户数; 用 η 表示平均成功译码用户比。这一部分我们推导了总传输次数 CI 和源信息包数 N 之间的关系, 以及平均成功译码用户比 η 和源端发送的编码包数 t 之间的关系。

我们将源端有限的半径为 R 的覆盖范围划分成 Q 个相同宽度的同心圆环, 则每个圆环的宽度等于 $\frac{R}{Q}$ (如图 1), 第 i 个圆环的内半径和外半径大小

分别为 $\frac{(i-1)R}{Q}$ 和 $\frac{iR}{Q}$ 。我们假定 Q 是足够大, 则同一

个编码包到达第 i 个圆环经历几乎相同的擦除信道, 因此同一个圆环中任一用户的译码概率可看作是相同的, 即 $P(r_i) = P\left(\frac{iR}{Q}\right)$ 。另 K_i 为第 i 个圆环中的

的用户数, 则有: $K_i = 2\pi r_i \rho dr$ 。

用随机变量 $f(r_i)$ 表示第 i 个圆环中成功译出源信息包的用户数, 则 $f(r_i)$ 服从二项分布, 如下所示:

$$P_U(f(r_i) = m) = \binom{K_i}{m} P(r_i)^m (1 - P(r_i))^{K_i - m} \quad (4)$$

众所周知, 成功概率为 p , 试验次数为 x 的服从

二项分布的随机变量可以等效为服从参数为 $\lambda = xp$ 的泊松分布变量 (当 x 是较大, p 较小)。而在实际应用场景中, 用户数是相当大的, 且分布在基站附近的用户很少, 仿真环境中用户以面积而不是以半径均匀分布在基站周围, 基站附近用户也是较少的, 即 $P(r_i)$ 普遍较小。因此我们将 $f(r_i)$ 等效为服从参数为 $\lambda_i = K_i P(r_i)$ 的泊松变量误差是很小的。又因为总的

成功译码用户数为: $f = \sum_{i=1}^Q f(r_i)$, $f(r_i)$ 为互相独立, 且服从参数为 λ_i 的泊松随机变量, 故 f 为服从参数为 $\lambda = \sum_{i=1}^Q \lambda_i$ 的泊松变量。由泊松分布的性质, 当源端

发送 t 个编码包后, 可以成功译出源信息包的用户数的均值为 $E[f] = \lambda$ 。当 Q 足够大时我们有:

$$\lambda = \lim_{Q \rightarrow +\infty} \int_0^R 2\pi r \rho P(r) dr \quad (5)$$

因此平均成功译码用户比为:

$$\eta = \frac{\lambda}{K} \quad (6)$$

当所有用户都能够成功译出源信息包时, 平均传输次数为:

$$CI = N + \sum_{i=N}^{\infty} \left(1 - \prod_{j=1}^K P^j(r)\right) = N +$$

$$\sum_{i=N}^{\infty} \left\{1 - \prod_{j=1}^K \left[\sum_{\tau=N}^i \binom{\tau-1}{N-1} (P^j(r))^{\tau-N} (1 - P^j(r))^N \right] \right\} \quad (7)$$

其中 $P^j(r)$ 代表离源端距离为 r 的 U^j 能够成功译出源信息包的概率。

令

$$w = \prod_{j=1}^K \left[\sum_{\tau=N}^i \binom{\tau-1}{N-1} (P^j(r))^{\tau-N} (1 - P^j(r))^N \right] \quad (8)$$

则有,

$$\log_2(w) = \sum_{j=1}^K \log_2(P^j(r)) \quad (9)$$

当 Q 足够大且用户以密度 ρ 均匀分布时, 在同一圆环内的任何用户可以被看作具有相同的译码概率 $P(r_i) = P\left(\frac{iR}{Q}\right)$ 。因此公式(9)可近似得到:

$$\log_2(w) = \int_0^R \rho 2\pi r \log_2(P(r)) dr \quad (10)$$

因此,总共需要的传输次数为:

$$CI = N + \sum_{t=N}^{\infty} \left(1 - 2 \int_0^R \rho 2\pi r \log_2(P(r)) dr \right) \quad (11)$$

故源端每个数据包的平均传输次数为:

$$\overline{CI} = \frac{CI}{N} \quad (12)$$

4 仿真结果评估

在这一部分,我们通过计算机仿真对公式(6, 12)的近似准确性进行评估。接下来我们比较了擦除信道下基于 RLNC 和 LT 码的广播性能。仿真参数和系统模块分别如表 1 和图 3 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	符号	取值
源信息包数	N	10-30
覆盖半径	R	6 m
用户密度	ρ	0.6-20
发送功率	P	10 W
路径衰减指数	α	2
块衰落因子	μ	10-50

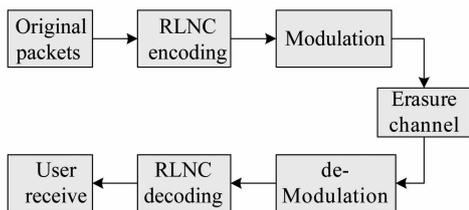


图 3 系统仿真框图

Fig. 3 System block diagram used in the simulation

4.1 广播信道模型

源端 S 广播的编码包采用二进制相移键控 (BPSK) 调制, 用户一直处于监听状态。我们将 S 和它覆盖范围内的用户之间的信道建模成相互独立的瑞利块衰落信道, 其中一个块由一个编码包 (l 比特) 组成。如图 3 所示, 一方面, 如果发送比特速率大于瞬时信道容量, 编码包将会被擦除, 当用户离 S 距离为 r 时编码包被擦除的概率为 $p(r)$ 。另一方面, 如果发送比特速率小于瞬时信道容量, 我们认为编码包将会被正确接收。并且任何编码包经过擦除信道后以概率 $p(r)$ 被擦除, 它是独立于其

他编码包的传输。

4.2 结果准确性估计

当源端发送 t 个编码包后, 用户试着去译出源信息包。对一个固定的 t , 图 4 给出了平均译码用户百分比 η , 可以看出我们推导的公式(6)的理论值和仿真结果十分接近。

由公式(1), 擦除概率 $p(r)$ 还取决于其他参数比如: 路径衰减指数 α 和块衰落因子 μ 。图 4 显示了 μ 对 η 的影响以及公式(6)的近似准确性。对一个固定的 r , 随着 μ 的增加, 擦除概率 $p(r)$ 逐渐减小。也就是说随着 μ 的增加, S 和用户间擦除信道的可靠性越来越高。因此, 一个广播包将会被 S 覆盖范围内的更多用户正确接收。故对一个固定的 t , 随着 μ 的增加, η 随之增加。

对一个固定的源信息包数 N , 图 5、6 给出了为保证源端覆盖范围内的用户都能正确译出源信息包, 源端每个数据包的平均传输次数 \overline{CI} , 可以看出我们推导的公式(12)的理论值和仿真结果十分接近。

图 5 显示了 μ 对 \overline{CI} 的影响以及公式(12)的近似准确性。根据前面讨论的结果, 对一个固定的 r , 随着 μ 的增加, 一个广播包将会被 S 覆盖范围内的更多用户正确接收。因此为保证源端覆盖范围内的用户都能正确译出源信息包, 需要的发送编码包数 t 逐渐减小。并且当其他参数都固定时, 随着源信息包数 N 的增加, \overline{CI} 逐渐减小。

图 6 显示了用户密度 ρ 对 \overline{CI} 的影响以及公式(12)的近似准确性。由于用户是在源端覆盖范围内均匀分布且它们的接收特性统计独立, 故 $p(r)$ 是独立于 ρ 的。然而我们可以看到, 一方面, 随着 ρ 的增加, \overline{CI} 逐渐增加。另一方面, 随着 ρ 的增加, 仿真结果和公式(12)近似结果的差距逐渐减小。换言之, ρ 的增加将会导致更好的近似准确性和更大的平均传输次数。这是因为增加 ρ 相当于增大了用户数 K , 那么所有用户都能成功译码的概率将会减小, 因此导致更大的平均传输次数。并且用户密度 ρ 的增加和我们用户对用户是均匀分布在以源端 S 为圆心的无限窄的圆环内这一假设更加接近, 因此推导的公式和仿真结果也更加接近。

4.3 RLNC 与 LT 方案对比

这一部分我们对基于随机线性网络编码和 LT

码的广播方案性能进行了比较。在 LT 码方案中, 编码过程所使用的度分布为鲁棒孤波 (Robust Soliton) 度分布, 译码过程使用的是置信度传播 (Belief propagation, BP) 算法。

由图 7 可以看出, 对一个固定的块衰落因子 μ , 基于 RLNC 的广播方案比 LT 码有更小的平均传输次数。由图 8 可以看出, 对一个固定的源信息包数 N , 基于 RLNC 的广播方案比 LT 码有更小的平均传输次数。这是因为 RLNC 的编码系数选自有限域 $F_q(q$ 足够大) 而 LT 码编码系数选自二进制有限域 (高斯域 F_2), 这意味着 RLNC 方案在构建编码矩阵 C 时有更大的自由度。因此当 RLNC 被用作擦除信道编码时, 用户有更大的机会得到一个满秩的编码矩阵, 这会导致更高的成功译码概率和更小的平均传输次数。LT 码用于传输编码系数的比特数更少, 这将会带来传输速率的增加。但其所传数据包的有用信息比 RLNC 要小, 需要传输更多的数据包才能正确译码。

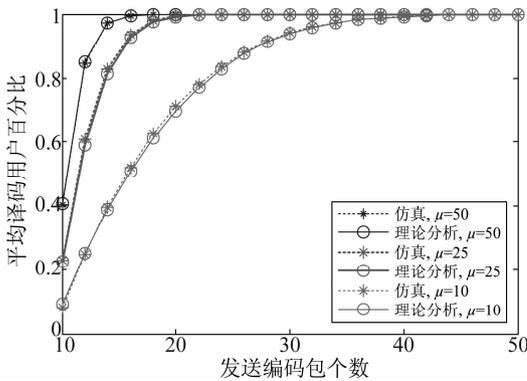


图 4 不同 μ 情况下的平均译码用户百分比, $\rho=10, N=10, q=8$
 Fig. 4 The effect of fading parameter μ on η in our approximation model when $\rho=10, N=10, q=8$

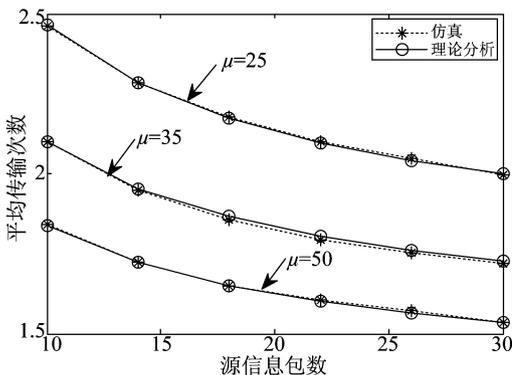


图 5 不同 μ 情况下的平均传输次数, $\rho=10, q=8$
 Fig. 5 The effect of fading parameter μ on \bar{CI} in our approximation model when $\rho=10, q=8$

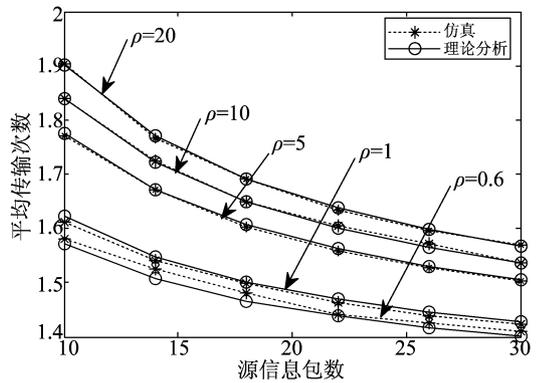


图 6 不同 ρ 情况下的平均传输次数, $\mu=50, q=8$
 Fig. 6 The effect of user density ρ on \bar{CI} in our approximation model when $\mu=50, q=8$

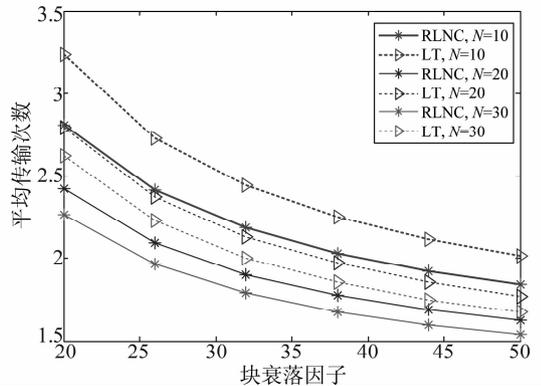


图 7 RLNC 和 LT 随 μ 变化的平均传输次数, $\rho=10, q=8$
 Fig. 7 Comparing the average number of required transmissions v. s. μ between RLNC and LT for $\rho=10, q=8$

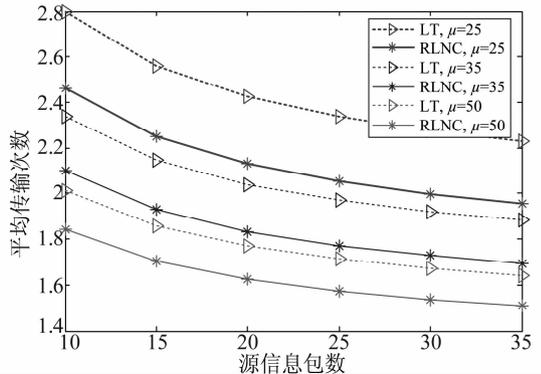


图 8 RLNC 和 LT 随 N 变化的平均传输次数, $\rho=10, q=8$
 Fig. 8 Comparing the average number of required transmissions v. s. N between RLNC and LT for $\rho=10, q=8$

5 结论

本文分析了基于随机线性网络编码的一源多均匀分布用户的无线广播系统性能, 其中广播信道为擦除信道。通过利用随机几何分析, 我们推导了该系统中的近似的平均传输次数和平均成功译码用户百分比。仿真结果表明, 理论近似推导结果和

实际仿真结果十分接近,且准确性随着用户密度的增加而增大。通过与 LT 码方案的比较表明,RLNC 方案相比 LT 码方案有很大的性能提升。同时,结果也表明一个用户接收到 N 个 RLNC 线性编码包即可以极高概率恢复出源信息包。对实际的工程系统设计有很大的简化指导作用。

参考文献

- [1] Xia X, Xu Y, Xu K, et al. Outage Performance of AF based Time Division Broadcasting Protocol in the Presence of Co-channel Interference [C] // in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC), Shanghai, China, Apr. 2013.
- [2] 杨波,于宏毅,吕凌,等.一种选择发送的协作网络编码及其性能分析[J]. 信号处理, 2010, 26(1): 104-109.
Yang Bo, Yu Hongyi, Lü Ling, et al. Performance Analysis of a Cooperative Network Coding Based on Selective Transmission [J]. Signal Processing, 2010, 26(1): 104-109. (in Chinese)
- [3] Li S, Yeung R, Cai N. Linear network coding[J]. IEEE Trans. on Inf. Theory, 2003,49(2): 371-381.
- [4] Koetter R, Medard M. An algebraic approach to network coding [J]. IEEE/ACM Trans. Networking, 2003, 11(5): 782-795.
- [5] Sundararajan J, Sadeghi P, Medard M. A feedback-based adaptive broadcast coding scheme for reducing in-order delivery delay [C] // in Proc. Workshop on Network Coding, Theory, and Applications (NETCOD), 2009: 1-6.
- [6] Barros J, Costa R, Munaretto D, et al. Effective delay control in online network coding [C] // Proc. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), April. 2009:208-216.
- [7] Esmaeilzadeh M, Aboutorab N. Joint Optimization of Throughput and Packet Drop Rate for Delay Sensitive Applications in TDD Satellite Network Coded Systems [J]. IEEE Trans. Inf. Communication, 2014,62(2): 676-690.
- [8] Firooz M, Roy S. Collaborative downloading in vanet using network coding [C] // in IEEE International Conference on Communications (ICC), 2012: 4584-4588.
- [9] Shokrollahi A. Raptor codes [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2006,52(6): 2551-2567.
- [10] Luby M. LT codes [C] // in Proc. 43rd Ann. IEEE Symp. Found. Comput. Sci., 2002: 271-280.
- [11] Choi S, Park J. Massive Parallelization technique for Random Linear Network Coding [C] // in IEEE Big Data and Smart Computing (BIGCOMP), 2014: 296-299.
- [12] Lucani D, Medard M, Stojanovic M. On coding for delay network coding for time-division duplexing [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2012,58(4): 2330-2348.
- [13] 杨林,郑刚,马恒太. 基于随机网络编码的无线广播重传方案及性能分析 [J]. 信号处理, 2010, 26(1): 110-114.
Yang Lin, Zheng Gang, Ma Hengtai. A wireless broadcast retransmission scheme based on random linear network coding and its performance analysis [J]. Signal Processing, 2010, 26(1): 110-114. (in Chinese)
- [14] Swapna B, Eryilmaz A, Shroff N. Throughput-Delay Analysis of Random Linear Network Coding for Wireless Broadcasting [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2013, 59(10): 6328-6341.
- [15] Firooz M, Hu Z, Roy S. Random Linear Network Coding for Reliable Broadcasting [C] // in IEEE Globecom Communications QoS, Reliability and Modelling Symposium 2014: 1237-1241.
- [16] Goldsmith A. Wireless communications [M]. Cambridge University Press, 2005.
- [17] MacKay D. Fountain codes [J]. in IEEE Proc. Communications, 2005, 152(6): 1062-1068.
- [18] Ho T. Networking from a network coding perspective [J]. Ph. D. Dissertation, Massachusetts Inst. Technol., Cambridge, MA, USA, 2004.

作者简介



孙小丽 女,1992 年生,河南邓州人,解放军理工大学通信工程学院,硕士研究生,主要研究方向为移动通信、大规模 MIMO 等。

E-mail: lgdxsunxiaoli@sina.com



许魁 男,1982 年生,安徽蚌埠人,解放军理工大学讲师、硕士生导师,主要研究方向为移动通信、信道编码技术等。

E-mail: lgdxxukui@126.com



谢威 男,1978 年生,江西萍乡人,解放军理工大学通信工程学院,讲师,主要研究方向为移动通信、协同通信等。

E-mail: edifier77@126.com



徐友云 男,1966 年生,浙江兰溪人,解放军理工大学教授、博士生导师,主要研究方向为移动通信、信道编码技术等。

E-mail: yyxu@vip.sina.com