

數位噴泉技術實現不等差錯保護的優化設計

Optimal Design of Unequal-Protected Rateless Codes for Layered Streaming

曾維亮 Wei-Liang Zeng, 朱宏傑 Hong-Jie Zhu, 裴玉奎 Yu-Kui Pei, 陸建華 Jian-Hua Lu

北京清華大學電子工程系

zengwl@wmc.ee.tsinghua.edu.cn

摘要

隨著多媒體廣播應用的越來越廣泛，對於資訊分層的需求也越來越突出。本文首先針對資訊分層後不同優先順序的層間如何進行不等差錯保護 (UEP) 的問題，提出了一種與噴泉碼自身的編解碼過程完全解耦的 UEP 調度方案：機會噴泉，然後分別建立了系統開銷一定下使用者滿意度最大和使用者滿意度一定下系統開銷最小的優化模型。通過優化概率分佈來控制不同層的資料包開銷量，以此達到不同資訊層的不等差錯保護。模擬結果表明：機會噴泉的方案在最優設計下，用戶滿意度較之相等差錯保護的方案有 10%~15% 的提升。

關鍵字：不等差錯保護、機會噴泉、多媒體廣播、數位噴泉技術。

Abstract

With the explosive growth of multimedia broadcasting applications in recent years, the demand for layered streaming has increased significantly. In order to meet the quality of service requirements, unequal error protection technique has been considered. In this paper, we propose an opportunistic fountain scheme for layered streaming using rateless codes. The proposed scheme provides unequal error protection property by scheduling strategy, decoupled from rateless code structure. To find the optimal scheduling strategy two optimization models are developed, which maximizes the user satisfaction degree subject to overhead and minimizes the overhead subject to some fixed user satisfaction degree respectively. Simulation results show that with the optimal design of the opportunistic fountain scheme, user satisfaction degree is improved by 10% ~ 15% compared to EEP scheme.

Keywords: Unequal Error Protection, Opportunistic Fountain, Multimedia Broadcasting, Rateless Codes.

1 引言

在多媒體廣播中，為了減小有損傳輸下錯誤對資料的影響，資料通常採用可伸縮性視頻編碼 (SVC)

方案[1]。該方案將資料分成若干層進行傳輸，高層資料 (higher layer) 是在低層資料 (lower layer) 的基礎上通過增量的方式對資訊品質進行改善。而不同使用者對資訊品質的需求可以是不同的，這樣就有了服務等級 (service grade) 的概念：一個需求 t 等級服務的使用者其資訊由第 1 到第 t 層的資料共同構成。如果其中任意層資料丟失，則該使用者的服務品質便無法得到保證。對於這種資訊分層使用者分等級的應用，低層資料的重要性是不言而喻的。然而在傳輸的過程中，各層資料包的丟失沒有差別。因此，為了保證服務品質，不等差錯保護 (UEP) 的傳輸策略是必需的。不等差錯保護編碼最早由 Imai 和 Hirakawa 實現，之後被廣泛用到語音通道聯合編碼、圖像通道聯合編碼及編碼調製中[2]，近些年還有學者提出了基於 LDPC 的 UEP 設計[3][4]。

在廣播環境中，數位噴泉技術作為一種非固定碼率 (Rateless) 的編碼現在已經成為研究熱點。其發端編碼過程就如同噴泉源源不斷噴出水滴，而收端只需接收到足夠的數量即可解碼[5][6]。在這個過程中，發端無需考慮多個收端不同通道及接收特性的影響，收端也無需回饋丟失包的序號，這一特點使得數位噴泉技術對於廣播業務有著極大的吸引力。

針對多媒體廣播業務中不等差錯保護的需求，目前主要有以下幾種針對數位噴泉技術的 UEP 方案。文獻[7]提出了一種通過重新設計噴泉碼的度分佈，使編碼器以更高的概率選擇高優先順序的資訊包 UEP 方案。文獻[8]給出了一種通過依據符號的重要程度，來選擇其編碼符號度的演算法。文獻[9]給出的方法是加入預編碼模組對不同層的資料進行不等的碼率調整來實現資訊的不等優先順序。文獻[10]採用系統碼設計，第 i 層編碼的冗餘包由所有大於等於第 i 層的資料包共同編成，這樣高層包就可以輔助低層包的解碼，實現 UEP。以上幾種方案的具體分析見下一節。

本文提出一種機會噴泉的 UEP 解決方案，這種方案所有層的編碼器結構相同，通過調度策略來控制不同層資料的冗餘來實現不等差錯保護。它與噴泉碼自身的編解碼過程沒有耦合關係，可以充分利用已有的優秀度分佈設計結果。在此調度方案的基礎上，分別建立了在系統開銷一定下使用者滿意度最大和使用者滿意度一定下系統開銷最小的優化模型，並給出模型的模擬分析。

後文安排如下：第一部分對已有的數位噴泉技術 UEP 方案進行介紹，第二部分論述機會噴泉的 UEP 解決方案，第三部分是模型模擬和結果分析，最後對全文進行總結。

2 數位噴泉技術的UEP方案

數字噴泉 (Digital Fountain) 的概念是John Byers 及Michael Luby等人針對廣播和資料分發等應用提出的一種理想解決方案[11][12]，目前最典型的兩種噴泉編碼是LT碼[13]和Raptor碼[14]。這兩種編碼均可實現收端接收略大於 k 個編碼包就能以至少 $1-\delta$ 的概率成功解碼，其中這個大於 k 的額外編碼包數量與 k 之比稱為解碼開銷 ε 。我們期望在解碼開銷 ε 儘量小的情況下能夠以儘量大的概率成功解碼，採用合理的度分佈[13]是實現的關鍵。

在數位噴泉技術中引入UEP的方案目前主要可以分為改變和不改變噴泉編碼本身的結構兩大類。

2.1 改變編碼結構

文獻[7]中，作者提出了一種將UEP的方案直接引入噴泉碼編碼結構的一種方法，通過設計噴泉碼的度分佈以使編碼器以更高的概率選擇高優先順序的資訊包。作者給出一個偏好係數 K_M 來調節度分佈對高優先順序資訊包的傾向性。然而這種方法的問題在於，雖然我們可以通過精心設計參數 K_M 以實現不等差錯保護的目的，但由於其改變了噴泉碼的度分佈，使得這樣的設計可能對性能產生一定的惡化，同時這樣的方法也不利於繼承已有的優秀的度分佈設計結果。

另一種方法是依據每個符號的優先順序來分配其相應的編碼符號度來實現UEP[8]。越重要的包分配其連接度越小，則其越容易被恢復。該作者提出了這種分配思想，是一種便於電腦實現的方法，但是就像其在文中所說的：具體實現時參數的選取和分配連接度所使用的策略還值得進一步的研究。

2.2 保持編碼結構

通過每層加入一個預編碼模組來使該層資訊包的碼率變為 $r_i=K_i/N_i$ 的方法也可以實現UEP[9]。對於總共有 L 層的資訊傳輸來說，就是讓碼率進行 $r_1 \leq r_2 \leq \dots \leq r_L$ 的調整。經過預編碼模組的碼率調整之後，將不同層資訊包級聯起來進行噴泉編碼。這種方法的優點在於預編碼模組與噴泉編碼解耦，度分佈無需重新設計，但遺憾的是作者並沒有給出一種設計的準則來設計碼率調整的方法，而且預編碼模組本身也有一定的開銷。

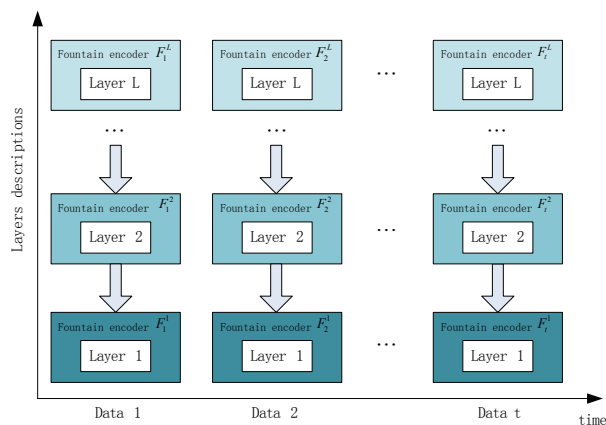
文獻[10]給出的方案採用系統噴泉碼，其第 i 層編碼的冗餘包是由所有大於等於第 i 層的資料包共同編碼構成的。這樣帶來的好處是當第 i 層資料不可解碼時，可以使用原本無法利用的大於 i 層的冗餘數據包來輔助解低層的資訊，這樣就加大了低層資料包的解碼概率，但是隨著資訊層數的增加這種方法將很大程度上增加編碼的實現複雜度。

針對已有方法的問題，下面一部分將給出一種新的保持編碼結構的不等差錯保護的解決方案。

3 機會噴泉的UEP解決方案

3.1 機會噴泉UEP方案

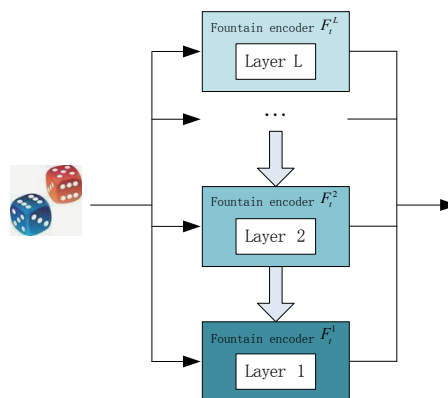
對於可伸縮性視頻編碼的應用，為了不破壞碼流本身所具有的時間相關及層間相關性，採用如圖一所示的編碼方案更合適[15]。其中每層每個資料塊都採用一個獨立的噴泉編碼器，垂直箭頭表示其層間的依賴關係， F_i^l 表示第 l 層第 i 個時間片的編碼。



圖一 分層編碼方案

對於噴泉編碼來說，使不同層資料具有不等差錯保護特性的本質在於使不同層資料具有不等的開銷量。因此設計的目標就在於通過調度方案，在某些約束下來分配各層資料的開銷。基於圖一的分層編碼結構我們提出如下的機會噴泉UEP方案，如圖二所示：

- (1)首先在 $1 \sim L$ 範圍選一個服從某一分佈（稱為調度方案）的整數 l 。
- (2)編碼器 F_i^l 工作，產生出一個編碼包發送到通道上。接下來我們所要做的就是依據某些準則來設計最優的調度方案。



圖二 機會噴泉UEP方案

3.2 調度方案優化

本節討論由上述調度方案所引出的兩個優化問題，它們分別是在系統開銷一定的條件下用戶滿意度最大，和在用戶滿意度一定的條件下系統開銷最小。

3.2.1 模型1：優化用戶滿意度

在這一部分我們討論在發端發送的資料包數目一定（開銷一定）時用戶滿意度最大的優化問題。用 M 表示使用者數目的總和， M_S 表示成功接收並解碼成功的用戶數，定義用戶滿意度 P_S 表示用戶成功接收並解碼成功的概率

$$P_S = \frac{M_S}{M} \quad (1)$$

其中 $M = \sum m_i$ ， $m_i (i=1, 2, \dots, L)$ 表示選擇第 i 等級服務的使用者數目。用戶滿意度 P_S 可以用全概率公式表示為不同等級使用者的解碼成功概率 $P(S|g_i)$ 的加權和，其中 S 表示解碼成功， g_i 表示第 i 等級的使用者。

$$\begin{aligned} P_S &= \sum_i P(g_i) \cdot P(S|g_i) \\ &= \sum_i \frac{m_i}{M} \cdot \prod_{k=1}^i P(S_{l_k}) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中第二個等號成立是因為不同層間編碼相互獨立，不同等級使用者的解碼成功概率是其所需資訊層的解碼成功概率 $P(S|g_i)$ 的乘積。

令 r_i 表示在時間片 t 時第 i 層資料包數目的比重， K 表示各個層的包數總和，則 $k_i = K \cdot r_i$ 表示在時間片 t 時第 i 層數據包的個數； N 表示系統由於頻寬受限在時間片 t 所給定的發包總數。這樣 N/K 就代表了系統的總開銷 $(1 + \varepsilon)$ ； p_i 表示待優化求解的在發端每類資訊被選擇發送的比例（調度方案），因此每層資訊實際被發出的包數 $N_i = N \cdot p_i$ 。令丟包率為 q ，則由全概率公式可以將 $P(S_{l_k})$ 寫成式(3)的形式。

$$P(S_{l_k}) = \sum_{R_k=0}^{N \cdot p_k} P(R_k) \cdot P(S_{l_k} | R_k) \quad (3)$$

其中 R_k 表示用戶收到 R 個第 k 層數據包， $P(R_k)$ 表示收到 R 個第 k 層資料包的概率，它服從二項公佈。 $P(S_{l_k} | R_k)$ 表示收到 R 個第 k 層包時該層的解碼正確率。

$$P(R_k) = \binom{N p_k}{R} q^{N p_k - R} (1 - q)^R \quad (4)$$

$$P(S_{l_k} | R_k) = 1 - P_{f_k} \left(\frac{R_k}{K r_k} \right) \quad (5)$$

其中 $P_{f_k}(1 + \varepsilon)$ 表示第 k 層數據在 $(1 + \varepsilon)$ 的開銷接收下對應的解碼失敗率。由式(2)~(5)我們建立使系統在給定發送包數目 N 的前提下，使用者滿意度最高的優化模型：

$$\begin{aligned} \max P_S &= \sum_i \frac{m_i}{M} \cdot \prod_{k=1}^i P(S_{l_k}) \\ \text{s.t.} &\begin{cases} \sum_i p_i = 1 \\ p_i > 0; i = 1, \dots, l \\ P(R_k) = \binom{N p_k}{R} q^{N p_k - R} (1 - q)^R \\ P(S_{l_k} | R_k) = 1 - P_{f_k} \left(\frac{R_k}{K r_k} \right) \\ P(S_{l_k}) = \sum_{R_k=0}^{N \cdot p_k} P(R_k) \cdot P(S_{l_k} | R_k) \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

3.3 模型2：優化系統總的開銷量

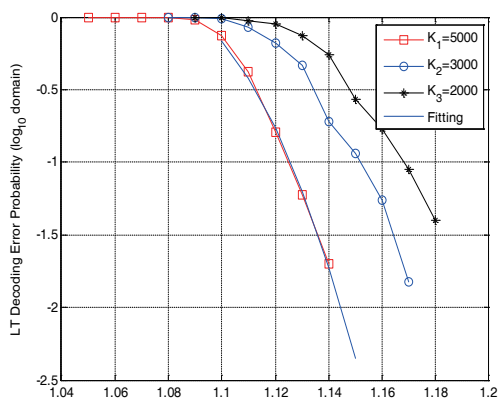
有了模型1的基礎，我們討論用戶滿意度一定時，發端發送的資料包數目最小的優化問題。建立下面的優化模型：

$$\begin{aligned} \min N & \\ \text{s.t.} &\begin{cases} \sum_i p_i = 1; \\ p_i > 0; i = 1, \dots, l \\ P_S = \sum_i \frac{m_i}{M} \cdot \prod_{k=1}^i P(S_{l_k}) = c \\ P(R_k) = \binom{N p_k}{R} q^{N p_k - R} (1 - q)^R \\ P(S_{l_k} | R_k) = 1 - P_{f_k} \left(\frac{R_k}{K r_k} \right) \\ P(S_{l_k}) = \sum_{R_k=0}^{N \cdot p_k} P(R_k) \cdot P(S_{l_k} | R_k) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

4 模擬及分析

4.1 模擬參數

在模擬中，每個噴泉碼編碼器 F_i^l 均採用LT碼，其度分佈選用RS分佈（Robust Soliton distribution）[13]，其分佈的參數 $c=0.1$ ， $\delta=0.5$ 。對於不同的包長 K ，解碼失敗率與開銷關係的模擬結果如圖三所示。可以看出在給定碼長的情況下，失敗率隨著開銷的增加而減小；在開銷一定下，隨著碼長的減小失敗率提高。在接下來的模擬中取不同層之間包長相同 $k_i=5000$ 。



圖三 LT碼解碼失敗率

失敗率函數 $P_f(1+\varepsilon)$ 的精確表示是一個複雜的反覆運算形式[16]，為得到它的顯式用於優化求解，可以通過模擬得到 $P_f(1+\varepsilon)$ ，進而用多項式擬合的方法得到其函數關係[17]。 $P_f(1+\varepsilon)$ 在包長取5000時，以10為底的對數座標下的二次函數擬合的結果為：

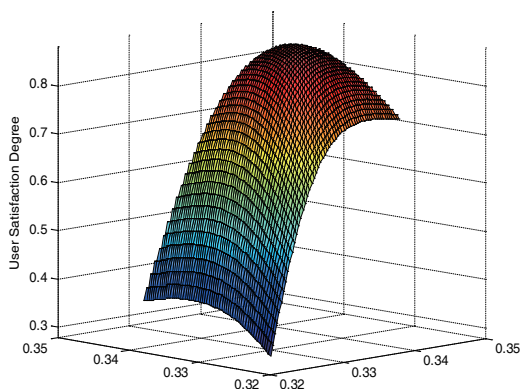
$$\log P_f(1+\varepsilon) = -454.68(1+\varepsilon)^2 + 979.31(1+\varepsilon) - 527.24$$

從圖三可以看出這樣的擬合在所關心的區間 ($1+\varepsilon \geq 1.1$) 還是很準確的。

其他模擬參數如下：數據層數 $L=3$ ；誤包率 $q=5\%$ ；A、B 分別表示不同等級使用者數 [6000 3000 1000] 和 [3000 2000 1000]。

4.2 模擬分析

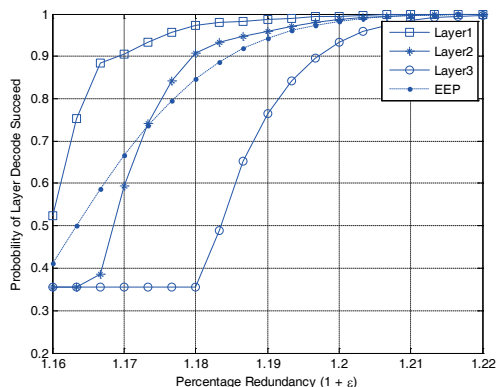
式(6)的優化求解是一個凸函數在約束條件下的極值問題，可以利用拉格朗日乘數法得到閉式解[18]或通過數值方法進行反覆運算求解。圖四給出的是在不同等級使用者數為A，給定系統總開銷量為1.18時，不同的概率分佈和用戶滿意度之間的關係。



圖四 概率分佈和用戶滿意度的關係

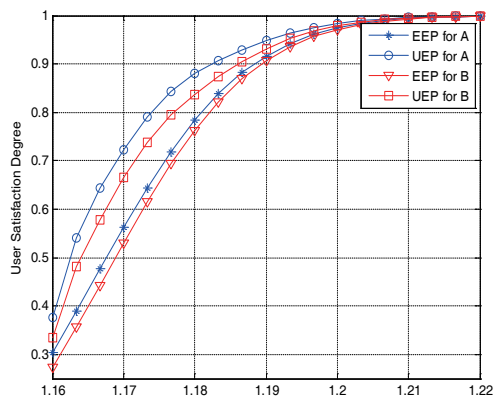
圖五是不同等級使用者數取參數A，在系統總開銷量取不同值下，模型1優化求解時不同層的解碼成功概率。EEP表示的是未採用不同差錯保護的情況，與其相

比，在相同系統開銷量的情況下，我們給出的方案使低層資料的成功解碼率更高。平層的出現是因為求解時限制了每層的求解區間在擬合區間 ($1+\varepsilon \geq 1.1$) 內而造成的。



圖五 不同層的解碼成功率

圖六給出了分別對於A、B兩組人群參數，採用了機會噴泉方案所帶來的用戶滿意度的改進。可以看出，在頻寬受限的情況下，使用者的解碼成功率較EEP方案大約有10%~15%的提升。而且人群比例差距越大，UEP帶來性能的提升越明顯。這是由於人群比例差距的增加，導致對不同層資訊的傾向性嚴重，故採用UEP方案帶來的增益也就越大。



圖六 用戶滿意度與開銷量的關係

從圖六可以看出，模型1的解具有單調性。因此模型2使用者滿意度一定時，發端發送的資料包數目最小的優化問題可以由模型1的結果對應得到。

5 結論

本文從多媒體廣播的需求出發，提出了機會噴泉的UEP解決方案。這種保持了噴泉碼本身結構的方案可以充分利用已有的優秀度分佈設計。它是依一定的概率分佈選擇分層編碼的編碼包進行發送，以此來控制每層資料的冗餘量，從而實現了不等差錯保護。在此方案的基礎上，分別建立了系統開銷一定下使用者滿

意度最大和使用者滿意度一定下系統開銷最小的優化模型，並給出了相應的模型模擬和結果分析。從模擬結果可以看出在加了這種簡單的調度方案後，用戶的解碼正確率有10%~15%的提升。

下一步可以進行的研究包括：將丟包率建模成一個受無線通道時變特性和緩衝區溢位共同影響的隨機變數，由此進行優化問題的建模與分析。

致謝

我們真誠的感謝王有政老師關於數位噴泉技術的極有價值的評述。本研究受到國家重點基礎研究發展規劃(973)專案(2007CB310600)和國家自然科學基金(60532070)的支持。

參考文獻

- [1] Schwarz H., Marpe D., and Wiegand T., et al., "Overview of the Scalable Video Coding Extension of the H.264/AVC Standard[J]," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 17, No. 9, 2007, pp.1103-1120.
- [2] Goldsmith A., "Wireless Communications[M]," Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2005, pp. 251-253.
- [3] Pishro-nik H., Rahnavard N., and Fekri F., et al., "Nonuniform Error Correction Using Low-density Parity-check Codes[J]," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 51, No. 7, 2005, pp. 2702-2714.
- [4] Rahnavard N., Fekri F., "Unequal Error Protection Using Low-density Parity-check Codes[C]," Proceedings 2004 IEEE International Symposium on Information Theory, 2004, pp. 449.
- [5] Mitzenmacher M., "Digital Fountains: A Survey and Look Forward[C]," 2004 IEEE Information Theory Workshop Proceedings, 2004, pp. 271-276.
- [6] Mackay D. J., "Fountain Codes[J]." IEEE Proceedings Communications, Vol. 152, No. 6, 2005, pp.1062-1068.
- [7] Rahnavard N., Vellambi B. N., and Fekri F., et al., "Rateless Codes with Unequal Error Protection Property[J]," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 53, No. 4, 2007, pp. 1521-1532.
- [8] Chang S., Yang K., and Wang J., et al., "Unequal-protected LT Code for Layered Video Streaming[C]," Communications, IEEE International Conference on, 2008, pp. 500-504.
- [9] Kozat U. C., Ramprasad S. A., "Unequal Error Protection rateless Codes for Scalable Information Delivery in Mobile Networks[C]," IEEE INFOCOM 2007: 26th IEEE International Conference on Computer Communications, May 6-12, 2007, pp. 2316-2320.
- [10] Hellge C., Schierl T., and Wiegand T., et al., "Multidimensional Layered Forward Error Correction Using Rateless Codes[C]," Communications, IEEE International Conference on, 2008, pp. 480-484.
- [11] Byers J. W., Luby M., and Mitzenmacher M., et al., "A digital Fountain Approach to Asynchronous Reliable Multicast[J]," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No. 8, 2002, pp. 1528-1540.
- [12] Byers J. W., Luby M., and Mitzenmacher M., et al., "A Digital Fountain Approach to Reliable Distribution of Bulk Data[C]," Computer Communication Review ACM SIGCOMM'98 Conference. Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication, 1998, pp. 56-67.
- [13] Luby M., "LT Codes[C]," Foundations of Computer Science, 2002. Proceedings. The 43rd Annual IEEE Symposium on, 2002, pp. 271-280.
- [14] Shokrollahi A., Shokrollahi A., "Raptor Codes[J]," Information Theory, IEEE Transactions on, 2006, Vol. 52, No. 6, pp. 2551-2567.
- [15] Kushwaha H., Kushwaha H., and Yiping X., et al., "Reliable Multimedia Transmission Over Cognitive Radio Networks Using Fountain Codes[J]," Proceedings of the IEEE, 2008, Vol. 96, No. 1, pp. 155-165.
- [16] Karp R., Luby, Shokrollahi A., et al., "Finite Length Analysis of LT Codes[C]," Proceedings 2004 IEEE International Symposium on Information Theory, 2004, pp. 39.
- [17] Luby M., Gasiba T., and Stockhammer T., et al., "Reliable Multimedia Download Delivery in Cellular Broadcast Networks[J]," IEEE Transactions on Broadcasting, 2007, Vol. 53, No. 1, pp. 235-245.
- [18] Weiliang Z., Hongjie Z., and Yukui P., et al., "Optimal Design of Unequal Error Protection for Fountain Code[J]", unpublished, 2008.

作者簡歷



Wei-liang Zeng received the B.S. degrees in electronic engineering from the University of Electronic Sciences and Technology of China, in 2007 with an outstanding thesis award. He is currently a PhD student in the Department of Electronic Engineering of Tsinghua University, China. His main research interests include channel coding, cooperative communications and wireless multimedia communications.



Hongjie Zhu (S'02) received his B. E. degree from Department of Radio Engineering, Southeast University in 2002. At present, he is a Ph.D candidate in Department of Electronic Engineering, Tsinghua University. His research interests include fountain codes, multimedia multicasting, and deep space communications.



Yukui Pei (S'02) received the B.S. degree and the Ph.D. degree in electronic engineering from Tsinghua University, Beijing, China, in 2002 and 2008, respectively. Now he is an assistant researcher in electronic engineering department of Tsinghua University. His research interests include the area of wireless communication, satellite communication and collaborative communication, primarily in error control coding and signal detection for wireless communications.



Jianhua Lu received his B.S.E.E. and M.S.E.E. degrees from Tsinghua University in 1986 and 1989, respectively, and Ph.D. in Electrical and Electronic Engineering from the Hong Kong University of Science and Technology. Since 1989, he has been with the Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University., where he now serves as a Professor. His current research interests include broadband wireless communication, multimedia signal processing, satellite communication, and wireless networking. Dr. Lu has been an active member of professional societies and has published more than 100 technical papers in international journals and conference proceedings. He served as the Panel/Invited Session Chair of the 2003 IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Communications, which was held in Beijing, China. He is a member of IEEE Communication Society and Signal Processing Society.