

在非完美回報通道中的合作式頻譜感測決策規則

楊雅茵^{*a}、夏年^a、楊竹星^a
國立成功大學電腦與通信工程研究所^a

摘要—感知無線電(Cognitive Radio)被用來解決無線網路設備爆發性增長造成的有限頻譜資源短缺的問題。頻譜感測(Spectrum Sensing)是感知無線電技術中重要的一環，合作式頻譜感測(Cooperative Spectrum Sensing)能大大提高頻譜感測的準確度。在回報通道不發生錯誤的前提下已存在大量的決策規則研究，然而回報通道的錯誤卻沒有受到足夠多的重視。本文考慮監聽和回報通道皆為不完美的衰減通道，提出了利用不同通道參數的類 MRC(Maximal Ratio Combining)決策規則來最小化頻譜感測的總錯誤概率。¹

一、簡介

感知無線電最初在 1999 年由 Milota[1]提出，Simon Haykin 在論文[2]中定義了感知無線電：一個能夠感知學習周圍環境並自動調整其發送功率，載波頻率以及調變方式等工作參數的智慧無線通訊系統。感知無線電是用來解決原有的固定頻譜分配造成的頻譜資源使用率低的問題。

頻譜感測是感知無線電中一個很重要的議題。在文獻[3-4]中研究人員研究了能量感測器、迴圈感測器、匹配濾波檢測器等不同的感測器。能量感測器由於不需要知道信號資訊得到了廣泛的使用，然而能量感測器在低信噪比的環境中表示卻不是很好。合作式頻譜感測被證實可以有效提高頻譜感測的表現[5-9]。

在合作式頻譜感測中，首先不同的次要使用者(Secondary user, SU)利用感測器感測主要使用者(Primary user, PU)佔用通道的資訊，然後將感測資訊透過回報通道(Reporting channel)傳送到融合中心(Fusion center)，融合中心則根據不同的決策規則來判斷主要使用者是否佔用通道。

在文獻[5]中研究人員研究且(and)規則，或(or)規則以及投票(voting)規則等硬決策規則，投票規則被認為是這三種中最好的決策規則。在這些文獻中都假定回報通道是完美的，然而由於距離等環境原因，回報通道的傳輸也會產生錯誤並對整個系統的錯誤率產生重要的影響。Sachin Chaudhari 等人[6-7]中研究並證明了在非完美回報通道中各種不同決策規則下 BEP(Bit Error Probability) wall 的存在並比較了硬決策規則以及軟決策規則的優劣。他們假定回報通道是二元對稱通道(Binary Symmetric Channel)，這相對而言也不是很實際。在文獻[8]中 Sachin Chaudhari 等人一般化回報通道

並證明在 Rayleigh 和高斯分佈的回報通道中也存在 BEP wall。作者為了簡化數學推導假定監聽通道是高斯分佈的。並且他們並沒有利用通道資訊來協助融合中心做決策，而通過評估理論[9]，通道資訊可以很完美的獲得。

本文考慮中控式感知無線電網路，假定監聽通道和回報通道都符合 Rayleigh 分佈並且融合中心充分知道通道資訊。本文比較了基於考慮不同通道參數的類 MRC 決策規則的優劣，提出了一個新奇的 Selection-based MRC 規則選擇監聽通道狀況良好的次要使用者進行合作式頻譜感測。本文的貢獻概括如下：

1. 對非完美 Rayleigh 分佈的回報通道進行研究。
 2. 提出了基於通道狀況的類 MRC 決策規則並比較數種類 MRC 規則的優劣。
 3. 提出一個新奇的次要使用者 Selection-based MRC 機制選取監聽通道狀況良好的次要使用者進行合作。
- 本文組織如下：第二部分闡述基本原理，第三部分闡述決策規則，第四部分模擬結果和分析，第五部分結論和展望。

二、基本原理

2.1 合作式感知系統模型

本文考慮的合作式感知系統模型包含一個主系統傳送端、 N 個參與合作式感知的次要使用者和一個獨立的融合中心。假定所有監聽通道是獨立且相同的分佈，另外所有回報通道亦是獨立且相同的分佈。而監聽通道和回報通道的分佈可以不同。如下圖 1 所示，假設次要使用者使用能量檢測器判斷主要使用者是否正在使用通道，然後作出一個位元的決定，接著再將決策結果傳送給融合中心，此處我們不考慮回報通道之間的干擾。

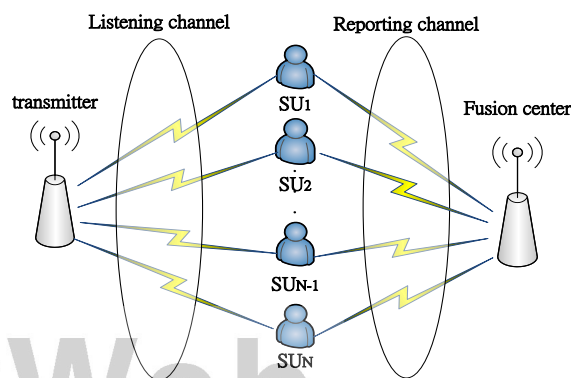


圖 1：分佈在不同位置的次要使用者檢測主要使用者資訊，並把二元決定通過 Rayleigh 分佈的回報通道傳送給融合中心，融合中心根據不同的決策策略做出決定。

¹ 本研究由國科會贊助，計畫編號 NSC 101-2218-E-006 -012 和 NSC 102-2221-E-006 -145。

s 表示發射端發送的信號， h 表示通道參數， n 表示高斯白色雜訊， r 表示接收端接收到的信號。 r 可以表示如下：

$$r = hs + n. \quad (1)$$

定義 I 為指示函數。次要使用者將接收到的信號的能量 E 與預先定義好的門檻值 γ 比較：如果大於等於門檻值則置 I 為 1 (表示主要使用者在使用通道)，小於門檻值則置為 0 (表示主要使用者使用通道)，如下式所示：

$$I = \begin{cases} 1, & E \geq \gamma \\ 0, & E < \gamma \end{cases}. \quad (2)$$

2.2 錯誤預警概率和漏檢概率

我們定義 $H1$ 為主要使用者正在使用通道， $H0$ 表示主要使用者沒有使用通道。 $P(H1|H0)$ 表示在主要使用者沒有使用通道的前提下判斷主要使用者正在使用通道的概率，即錯誤預警概率； $P(H0|H1)$ 表示在主要使用者正在使用通道的前提下卻錯誤判斷主要使用者沒有使用通道的概率，即漏檢概率。 $P_{f,i}$ 表示為第 i 個次要使用者的錯誤預警概率； $P_{m,i}$ 表示為第 i 個次要使用者的漏檢概率。因此第 i 個次要使用者的檢測概率 $P_{d,i}$ 可以表示為如下：

$$P_{d,i} = 1 - P_{m,i}. \quad (3)$$

我們定義第 i 個次要使用者的總錯誤概率 $P_{total,i}$ 為：

$$P_{total,i} = P_{f,i} + P_{m,i}. \quad (4)$$

我們尋找合適的能量檢測器能量門檻值 γ 使得每個次要使用者總錯誤概率 $P_{total,i}$ 足夠低，再通過合作式頻譜偵測來進一步降低總錯誤概率 $P_{total,i}$ 。

定義 P_f^{rule} 、 P_m^{rule} 和 P_d^{rule} 分別為在融合中心的錯誤預警概率、漏檢概率和檢測概率。上標 *rule* 代表不同的決策規則。 P_{total}^{rule} 為在融合中心的總錯誤概率。

$$P_{total}^{rule} = P_f^{rule} + P_m^{rule}. \quad (5)$$

三、決策規則

3.1 已存在的決策規則

在完美回報通道下，先前的文獻中[10]討論了使用能量檢測器的不同的硬決策規則：且(*and*)規則，或(*or*)規則以及投票規則 (*voting rule*)。投票規則被認為是在硬決策規則中總錯誤率最低的規則。

且規則：所有的 N 個次要使用者都認為主要使用者在使用通道則融合中心認為主要使用者在使用通道。總檢測概率與漏檢概率分別為：

$$P_d^{and} = \prod_{i=1, \dots, N} P_{d,i}. \quad (6)$$

$$P_m^{and} = 1 - P_d^{and}. \quad (7)$$

或規則： N 個次要使用者中至少有一個次要使用者認

為主要使用者在使用通道，則融合中心就認為主要使用者在使用通道。總檢測概率和漏檢概率分別為：

$$P_d^{or} = 1 - \prod_{i=1, \dots, N} (1 - P_{f,i}). \quad (8)$$

$$P_m^{or} = 1 - P_d^{or}. \quad (9)$$

投票規則： N 個次要使用者中有超過一半的次要使用者認為主要使用者在使用通道，則融合中心認為主要使用者在使用通道。我們假設每個次要使用者有相同的檢測概率 P_d 和錯誤預警概率 P_f 。總檢測概率和漏檢概率分別為：

$$P_d^{major} = \sum_{k=\lfloor N/2 \rfloor}^N \binom{N}{k} P_d^k (1 - P_d)^{1-k}. \quad (10)$$

$$P_m^{major} = 1 - P_d^{major}. \quad (11)$$

3.2 EGC (Equal Gain Combining) 和 MRC (Maximize Ratio Combining)

當考慮不完美的回報通道下，融合中心結合通道參數對次要使用者做出的經過調變後的信號進行融合，根據不同的結合規則可以分為 EGC 和 MRC 結合規則。如下式所示：

$$d_{fc} = \sum_{i=1}^N w_i (h_{re,i} S_{I_i} + n_i). \quad (12)$$

$$D = \begin{cases} 1, & d_{fc} \geq \theta \\ 0, & d_{fc} < \theta \end{cases}. \quad (13)$$

d_{fc} 代表決策的統計量 (decision statistic)， S_{I_i} 表示根據第 i 個次要使用者做出的決定後傳送的調變信號， w_i 表示第 i 個次要使用者的權重， D 表示在融合中心做出的決定，門檻值 θ 可能會因不同調變技術而改變。

EGC 結合規則：融合中心給每一個次要使用者賦予相同的權重即 w_i 等於 1。

MRC 結合規則：融合中心根據每個次要使用者的通道狀況對其做出的決策賦予不同的權重值。

在本文中同時考慮監聽通道和回報通道，並且假定監聽通道和回報通道是相互獨立的。我們表示 Rayleigh 分佈的監聽通道的係數為 h_{ls} ，Rayleigh 分佈的回報通道的係數為 h_{re} 。令 h_{prod} 為監聽通道與回報通道的乘積，表示如下：

$$h_{prod} = h_{ls} * h_{re}. \quad (14)$$

本文根據使用不同的通道狀況提出了三個 MRC 結合規則：Listen-based MRC, Report-based MRC 以及 Channel-based MRC。

Listen-based MRC: 利用監聽通道的通道參數做 MRC， w_i 如下式所示：

$$w_i = \frac{h_{ls,i}}{\sum_{k=1}^N h_{ls,k}}. \quad (15)$$

$h_{rs,i}$ 表示第 i 個次要使用者監聽通道 Rayleigh 分佈的參數。

Report-based MRC: 融合中心利用回報通道的通道參數做 MRC, w_i 如下式所示:

$$w_i = \frac{h_{re,i}}{\sum_{k=1}^N h_{re,k}} \quad (16)$$

$h_{re,i}$ 表示第 i 個次要使用者回報信 Rayleigh 分佈的參數。

Channel-based MRC: 融合中心利用監聽通道和回報通道的通道參數的乘積做 MRC, w_i 如下式所示:

$$w_i = \frac{h_{prod,i}}{\sum_{k=1}^N h_{prod,k}} \quad (17)$$

$h_{prod,i}$ 表示第 i 個次要使用者監聽通道和回報通道 Rayleigh 分佈的參數的乘積。

3.3 選擇原理

我們假設監聽通道的通道狀況比回報通道的通道狀況差。這在實際上也是合理的: 次要使用者與融合中心的距離相對更近因此通道狀況可以假設相對更加好。因此監聽通道的通道狀況對整個系統的決策更加重要。我們提出了 Selection-based MRC 原理, 選取監聽通道狀況良好的次要使用者進行合作, 來降低整個系統的錯誤率。具體步驟如下:

S1: 次要使用者通過估測器獲取監聽通道的通道參數;

S2: 選取合適的監聽通道的通道參數門檻值 λ 使得整個系統的總錯誤率比較低;

S3: 選取監聽通道的通道參數大於等於門檻值 λ 的次要使用者進行合作;

S4: 在融合中心對選取的次要使用者做 Channel-based MRC。

四、實驗結果

4.1 實驗環境

本文假定有一個主要使用者和 15 個次要使用者。每個次要使用者都是真實獨立同一的。監聽通道和回報通道都服從 Rayleigh 分佈。雜訊為加性高斯白色雜訊 (均值为 0, 標準差為 1)。信號採用 BPSK 編碼。載波頻率為 800MHz, 頻寬為 2MHz。我們設定回報通道的 SNR 為 25dB。試驗次數為 10000 多次。

4.2 實驗結果

我們首先來研究 Selection-based MRC 的門檻值 λ 與整個系統的總錯誤概率的關係。我們在監聽通道為 0dB, 回報通道為 25dB 的情況下, 觀察門檻值 λ 從 0 變化 3 時對應的總錯誤概率的變化。同時計算在監聽通道為

0dB 以及 15 個次要使用者時, EGC, Report-based MRC, Listen-based MRC 以及 Channel-based MRC 結合規則對應的總錯誤概率。

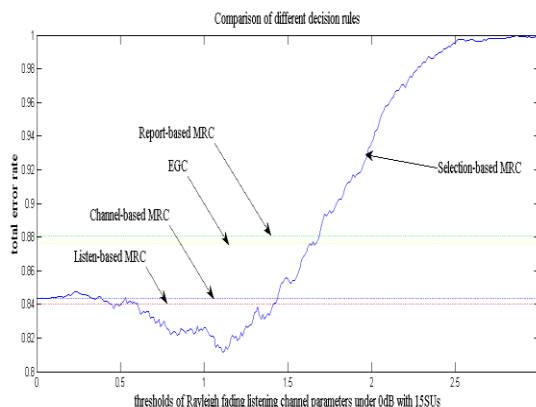


圖 2: 不同結合規則其總錯誤概率與監聽通道門檻值的關係。

如上圖 2 所示, 在監聽通道為 0dB 回報通道為 25dB 的情況下 Selection-based MRC 存在門檻值 λ 使得其總錯誤率在所有的結合規則中是最低的。圖中 EGC, Report-Based MRC, Listen-based MRC 以及 Channel-based MRC 結合規則的總錯誤不會隨著門檻值 λ 變化, 因為這些方法所考慮參與合作式頻譜感測的對象都是全體次要使用者, 所以它們都是水平線。我們提出的 Selection-based MRC, 參與合作式頻譜感測的對象是那些較能提供正確感知資訊的次要使用者 (監聽通道的通道參數大於門檻值的次要使用者), 隨著門檻值 λ 增加, 感測的資訊越正確, 但參與合作式頻譜感測的次要使用者數目可能會隨之減少, 因此門檻值 λ 的選擇存在一種權衡 (tradeoff) 的關係。

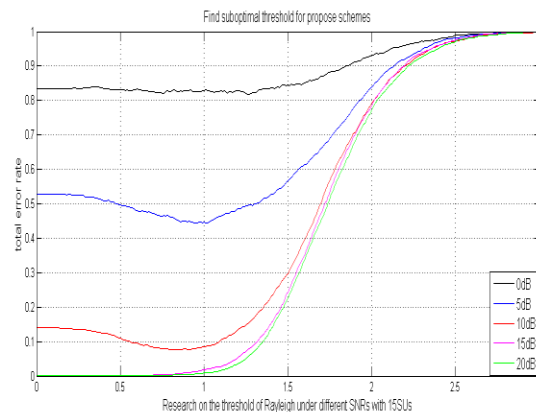


圖 3: 在回報通道 SNR 為 25dB, 監聽信道有不同 SNR 的情況時, 總錯誤概率與監聽信道的門檻值的關係。

圖 3 表示監聽通道 SNR 從 0dB 變化到 20dB 情況下, 都會存在合適的門檻值 λ 使得總錯誤概率足夠低。在圖 4 我們比較了且(or)規則, 或(and)規則, 投票規則(voting rule), EGC 結合規則, Report-based MRC, Listen-based MRC, Channel-based MRC 以及 Selection-based MRC 的 SNR 與總錯誤概率的關係。從圖 4 中可以看出隨著 SNR 的增加我們提出的 Selection-based MRC 有最低的總錯誤概率。在 SNR 比較低的時候, Selection-based MRC 由於

可能會無法選擇到合適的次要使用者導致總錯誤概率與不使用選擇原理相比高，這也是合理的。

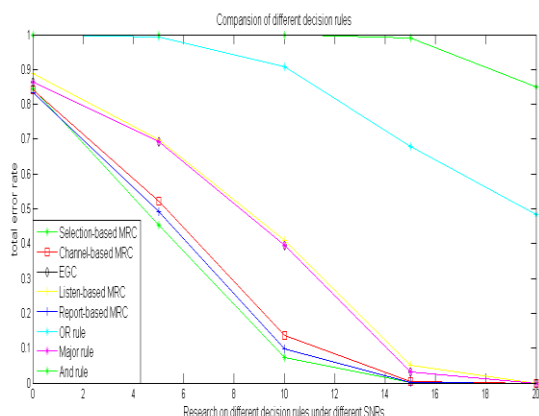


圖 4：不同結合規則其總錯誤概率與監聽通道 SNR 的關係。

結論

本文研究了服從 Rayleigh 分佈的非完美回報通道並提出了根據通道參數的 Listen-based MRC，Report-based MRC，Channel-based MRC。在 Channel-based MRC 基礎上提出基於選擇原理的 Selection-based MRC 選取通道狀況良好的次要使用者參與合作。未來還有很多工作要做：1.不同的次要使用者使用不同的發送功率；2.次要使用者的位置對系統的影響等等。

參考文獻

- [1] J. Mitola, Maguire, G.Q., Jr., "Cognitive radio: Making software radios more personal," IEEE Pers. Commun., vol. 6, no. 4, pp. 13–18, Aug. 1999.
- [2] Simon Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications." IEEE JSAC. vol. 23, NO.2, Feb 2005.
- [3] A. Sahai, N. Hoven, R. Tandra, Some fundamental limits incognitive radio, Allerton Conf. on Commun., Control and Computing 2004, October 2004.
- [4] P. D. Sutton, J. Lotze, K. E. Nolan, and L. E. Doyle, "Cyclostationary signature detection in multipath rayleigh fading environments," in Proc. IEEE Int. Conf. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Commun. (Crowncom), Orlando, Florida, USA, Aug. 2007.
- [5] E. Axell, G. Leus, and E. Larsson, "Overview of spectrum sensing for cognitive radio," in Int. Workshop Cognitive Inf. Process., pp. 322–327, 2010.
- [6] S. Chaudhari, J. Lundén, and V. Koivunen, "BEP walls for collaborative spectrum sensing," presented at the Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process., Prague, Czech Republic, May 22–27, 2011.
- [7] S. Chaudhari, J. Lunden, V. Koivunen, and H. Poor, "Cooperative sensing with imperfect reporting channels: Hard decisions or soft decisions?" IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 60, no. 1, pp. 18–28, jan. 2012.
- [8] Sachin Chaudhari, Jarmo Lundén, Visa Koivunen, H. Vincent Poor, "BEP walls for cooperative sensing in cognitive radios using K-out-of-N fusion rules", Signal Processing, Volume 93 Issue 7, Pages 1900-1908, July, 2013
- [9] S. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume II: Detection Theory. Prentice-Hall, 1998.
- [10] Srinivas Nallagonda, Sanjay Dhar Roy and Sumit Kundu, "Cooperative spectrum sensing with censoring of cognitive Radios in Rayleigh Fading Channel", in Proc. of IEEE Eighteenth National conference on Communications (NCC 2012), February 2012.