

# 客運專線群社區的應用

## Utilization of Group Cell in GSM-R for Passenger-Special Line

楊義 Yi Yang, 毅勇浩 Yong-hao Gu, 吳昊 Hao Wu

北京交通大學

軌道交通控制與安全國家重點實驗室

young520@163.com, guyonghao@sohu.com, hwu@bjtu.edu.cn

### 摘要

為了解決客運專線環境下GSM-R (GSM for Railway) 系統的頻繁切換問題, 本文在深入研究基於蜂窩移動通信中廣義群社區 (Group Cell) 和群切換 (Group Handover) 的基本概念與實現原理基礎上, 針對客運專線高速應用環境, 建立了GSM-R蜂窩網路的分散式多天線模型, 並進行了仿真。仿真結果表明: 空間分集技術實現了系統傳輸性能的極大提高, 降低了發射功率, 解決了高速率無線傳輸的電磁干擾問題; 並提出了一種適合高速移動用戶使用的切換演算法, 仿真結果表明該演算法減少了越區切換次數, 並在一定程度上克服了乒乓效應。

**關鍵字:** GSM-R、群社區、分散式MIMO、切換演算法。

### Abstract

In order to overcome the frequent handover problem occurred in GSM-R system, this paper presents a new model of distributed multi-antenna system, based on the principle and implementation methods of generalized group cell and group handover in GSM system. Simulation results indicate that spacious diversity can improve the transmission performance while the transmitting power is reduced. And it could resolve the electromagnetic interference problem of high-speed wireless transmission. An improved handover algorithm, which is suitable for high-speed user, is also proposed in this paper, and the simulation results show that the algorithm can reduce the times of handover and overcome some of the Ping-pong effect.

**Keywords:** GSM-R, Group Cell, Distributed MIMO, Handover Algorithm.

## 1 引言

在鐵路客運專線環境下, 列車運行速度的提高, 給通信環境帶來了很大的挑戰。隨著車速的提高, 列車在每個覆蓋社區穿行的時間縮短, 一定時間內的切換次數明顯增加, 頻繁的切換將會增加呼叫的阻塞

率, 嚴重降低系統效率, 造成資源的浪費, 而且也會造成切換失敗及通信品質的不穩定, 影響到列車的安全運行以及用戶的通信需求。增加重疊區、雙網覆蓋 [1] 等措施都在一定程度上保證了覆蓋效果, 提高了通信的安全性。但這些措施都是在原有的網路結構上進行的改進, 並沒有顯著地改善鐵路沿線的通信品質。

本文針對鐵路沿線特殊的環境特點, 分析了鐵路沿線無線電波的傳播特點, 提出一種新的鐵路沿線無線網路的組網模式——群社區, 通過將原有社區重新進行整合以及資源的優化分配, 以解決GSM-R頻繁切換的問題, 從而降低切換失敗對網路性能的影響, 並極大地提高了GSM-R系統的容量。

本論文結構安排如下: 第二節分析了群社區的組網結構, 並根據鐵路沿線環境的特殊特點, 將群社區應用於GSM-R網路; 第三部分闡述了實現群社區的關鍵技術——分散式天線, 並建立了分散式MIMO通道數學模型; 第四部分對提出的多天線通道進行了仿真分析; 第五部分針對客運專線高速環境, 提出了一種適合高速移動用戶的切換策略, 並進行了仿真分析; 第六部分是結論。

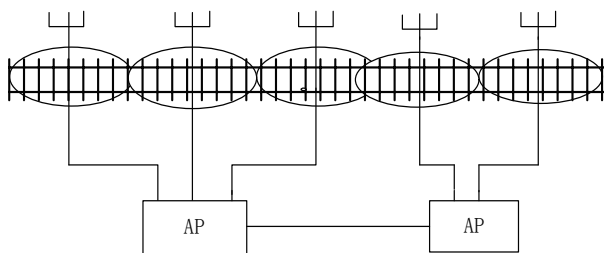
## 2 群社區結構

文獻[2][3]針對傳統的蜂窩移動通信系統, 提出了一種新型的構網模式——群社區 (Group Cell), 以及基於該網路架構下的新型切換模式——群切換 (Group Handover)。地理位置相鄰的多個社區組成一個群社區。在一個群社區中, 針對一個移動終端採用同一套通信資源 (頻率、時隙或碼道) 進行通信, 而針對其他移動終端分別採用不同套的通信資源進行通信。

群社區概念是能夠應用在多天線系統中的一種全新的組網結構, 可以充分利用多天線技術帶來的優勢, 並且系統的資源是由AP (Access Point) 來進行統一調度, 易於達到資源整體最優分配, 且更有利於利用先進的信號處理技術來有效地提高系統性能。

針對鐵路上由於車速過快而引起的頻繁切換問題, 可以通過群社區這一組網結構得到很好的解決。根據鐵路沿線GSM-R網路主要成帶狀分佈的特點, 將若干個蜂窩社區組成一個群社區, 由一個AP控制, 若干個AP連接到一個BSC。當列車在某一群社區內部穿行時, 系統給列車上的每個通信用戶分配唯一一個無線資源, 即同一頻率、時隙。只有當列車從一個群社區駛入另一個群社區時, 才需要進行越區切換過程。群

社區這一組網模式擴大了無線覆蓋範圍，具有更靈活的布網優勢，在很大程度上減少了越區切換的次數，減輕了系統的負擔。



圖一 鐵路沿線群社區結構

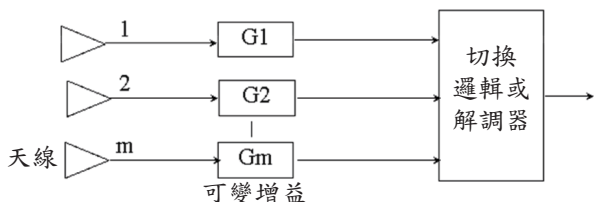
Figure 1: Group cell infrastructures along railway

### 3 分散式天線

#### 3.1 分散式天線的引入及分集技術

分散式天線是實現群社區結構的關鍵。每個社區由一個天線單元完成覆蓋。通過天線單元的靈活配置，在空曠地帶、大型車站、編組站以及隧道等處採用不同的相適應的覆蓋方案，可以在鐵路沿線形成很好的無線網路覆蓋。

為了減小多徑衰落的影响，以及改善列車高速運動引起的多普勒頻移產生的損耗，我們在每個社區的天線端使用多個天線，從而構成分散式MIMO系統。



圖二 分集接收原理圖

Figure 2: Diversity reception schematic diagram

分散式MIMO通信系統中，可以通過天線分集，利用空間天線資源提高系統的容量，保障傳輸的可靠性。分散在社區內的多個天線通過光纖和AP相連接。具有多天線的移動台和分散在附近的基站天線進行通信，與基站建立了MIMO通信鏈路。這樣的系統結構不僅具備了傳統的分散式天線系統的優勢，減少了路徑損耗，克服了陰影效應，同時還通過MIMO技術改善了多徑衰落和多普勒頻移，顯著提高了通道容量。

顯然，分散式MIMO系統與傳統的單天線社區相比，需要更多的天線。這要求天線結構簡單，成本低廉，適於大規模使用。如果在天線端增加複雜的信號處理，既造成信息量損失，又提高了天線的成本，所以分散式天線只完成無線信號的功率放大、光電轉換等最簡單的功能。AP完成所有的信號處理工作，包括調製/解調、通道編碼/解碼、通道測試、媒體介入控制、鏈路層控制、無線網路控制等等。

#### 3.2 分散式MIMO通道模型

分散式MIMO通道結合了普通的MIMO系統與分散式天線系統兩者的特點。兩者的有效結合，既可以改善系統的性能，也能提高系統的容量。該系統由一個移動台（MS）和N個相隔較遠的基站天線埠組成。在每個社區中，放置一個天線埠（天線陣列），該埠由L個天線單元組成。這樣，每個群社區中就包括N×L個天線單元。車載台可以架設M根天線，手持台由於體積等因素，暫認為仍然使用一根天線。在此只考慮車載台情況。車載台與群社區之間建立的這種天線系統就記為（M，N，L）分散式MIMO系統，相應的通道記為（M，N，L）分散式MIMO通道。

以上行通道為例，並先假設通道滿足平坦衰落條件。分散式MIMO傳輸模型可以描述為[4]：

$$r(t,d)=H(d)s(t)+n(t) \quad (1)$$

其中， $s(t)$ 是 $M \times 1$ 維發送信號向量，具有零均值單位協方差。 $n(t)$ 是 $NL \times 1$ 維加性高斯白雜訊向量，其中每個元素假設為具有獨立同分佈、零均值單位方差的複高斯變數。 $d=[d_1, d_2, \dots, d_N]^T$ 是一個 $N \times 1$ 的距離向量，其中的元素 $d_n$ 表示MS與第 $n$ 個社區的天線端之間的距離。由於天線陣列中各天線單元之間的距離較MS到社區的距離要小得多，所以這裏認為MS到某一天線端的各天線單元距離是一樣的。 $H$ 是 $NL \times M$ 維的分散式MIMO通道矩陣，與距離向量 $d$ 有關。對於上行通道而言，假設移動台到每個社區的天線陣的陰影衰落和小尺度衰落相互獨立，則通道矩陣 $H$ 包含了 $N$ 個獨立的 $L \times M$ 子通道，即：

$$H(d) = \begin{bmatrix} H_1(d_1) \\ H_2(d_2) \\ \vdots \\ H_N(d_N) \end{bmatrix}_{NL \times M} \quad (2)$$

其中子通道矩陣 $H_n(d_n)$ 是從MS到第 $n$ 個社區天線陣的 $L \times M$ 維子通道矩陣。

$$H_n(d_n) = [h_1^n(d_n) h_2^n(d_n) \dots h_M^n(d_n)]^T, \text{ 其中:}$$

$$h_m^n(d_n) = [h_{1m}^n(d_n) h_{2m}^n(d_n) \dots h_{lm}^n(d_n)]^T \quad (3)$$

$h_m^n(d_n)$ 表示從MS第 $m$ 個天線到第 $n$ 個社區中第 $l$ 個天線之間的通道。

對於鐵路沿線，無線網路覆蓋呈線狀分佈，各社區內的天線陣相隔較遠，MS到群社區內各個天線陣的距離差異較大，路徑損耗的影響不可忽略。而且，一般情況下，鐵路沿線地形起伏較小，車載台天線通常放置在列車頂部，受高大物體遮擋的影響較小，接收信號直射波占主導地位，傳輸延遲較小。由於存在著視距直射（LOS）分量，小尺度衰落認為服從Rician分佈。在地形起伏較大的丘陵、山區以及森林等高大遮擋物的地區，LOS將很難保證；由於車廂的遮罩，列車中的乘客在通話時，MS與基站端天線之間也將不存在LOS。在這些情況下，小尺度衰落將服從Rayleigh分佈。為方便討論，下面考慮Rician分佈，Rayleigh分佈是Rician因數 $K=0$ 的一種情況。

因此，本文考慮的複合通道模型包含了路徑損耗、陰影衰落和快衰落。陰影衰落服從對數正態 (lognormal) 分佈。子通道矩陣  $H_n(d_n)$ ,  $n=1, 2, \dots, N$ , 可以表示為：

$$H_n(d_n) = h_{sh}^n(d_n) \left( \sqrt{\frac{K}{K+1}} H_{LOS}^n(d_n) + \sqrt{\frac{1}{K+1}} H_{Rayleigh}^n \right) \quad (4)$$

式中  $h_{sh}^n(d_n)$  為移動台與第  $n$  個社區之間的陰影衰落與路徑損耗，服從均值為  $\mu_n$ ，標準差為  $\sigma_n$  的對數正態分佈。 $\mu_n$  為 MS 到第  $n$  個社區的相對路徑損耗。

(4) 式括弧中第一項表示小尺度衰落中 LOS 分量，第二項表示小尺度衰落中散射分量。 $H_{Rayleigh}^n$  是  $L \times M$  維的隨機矩陣，其元素為零均值單位方差相互獨立的複高斯隨機變數。 $H_{LOS}^n$  為  $L \times M$  矩陣。通道容量依賴於通道矩陣特徵值的分佈。在此對  $H_{LOS}^n$  考察兩種邊界情況： $H_{LOS}^n$  的秩為  $H_{LOS}^n$  和 1 滿秩的情況。 $H_{LOS}^n$  的秩為 1 時， $H_{LOS}^n$  為確定矩陣：

$$H_{LOS}^n(d_n) = \begin{bmatrix} \exp(-\frac{j2\pi d_n}{\lambda}) & \dots & \exp(-\frac{j2\pi d_n}{\lambda}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp(-\frac{j2\pi d_n}{\lambda}) & \dots & \exp(-\frac{j2\pi d_n}{\lambda}) \end{bmatrix}_{L \times M} \quad n=1, \dots, N \quad (5)$$

其中  $\lambda$  為載波波長。 $H_{LOS}^n$  滿秩時，

$$H_{LOS}^n(d_n) = \begin{bmatrix} \exp(j\theta_{11}) & \dots & \exp(j\theta_{1M}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp(j\theta_{L1}) & \dots & \exp(j\theta_{LM}) \end{bmatrix}_{L \times M} \quad n=1, \dots, N \quad (6)$$

其中  $\theta_{lm}$ ,  $l=1, 2, \dots, L$ ,  $m=1, 2, \dots, M$  為相互獨立並在  $[0, 2\pi]$  上均勻分佈的隨機變數。

### 3.3 分散式 MIMO 通道容量

#### 3.3.1 上行通道

假設接收方已知通道狀況，分散式 MIMO 上行通道的暫態容量 [5] 為：

$$C = \log_2 \det \left[ I_{NL} + \frac{1}{\sigma_n^2} H P^{1/2} Q (H P^{1/2})^H \right] (\text{bit/s/Hz}) \quad (7)$$

其中  $Q = E(SS^H) = I_M$  為發送信號的協方差矩陣。 $I_{NL}$  表示  $N \times L$  維的單位矩陣， $\sigma_n^2$  表示雜訊功率。 $H^H$  表示通道矩陣  $H$  的共軛轉置。設移動台的總發射功率一定，為  $P_t$ ，發射機不知道通道的狀態資訊時，在  $M$  個天線上平均分配，此時通道容量表示為：

$$C = \log_2 \det \left[ I_{NL} + \frac{P_t}{M \sigma_n^2} H H^H \right] \quad (8)$$

若定義信噪比  $\gamma = P_t / \sigma_n^2$ ，則式 (8) 可以改寫成：

$$C = \log_2 \det \left[ I_{NL} + \frac{\gamma}{M} H H^H \right] \quad (9)$$

它給出了所能實現的最大資訊速率的界。

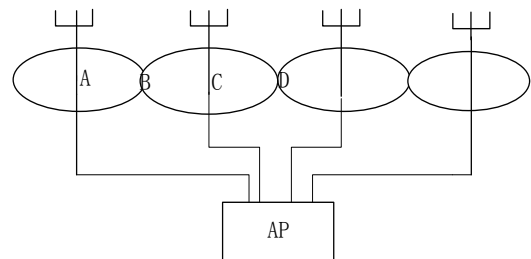
#### 3.3.2 下行通道

同樣在此假設發射總功率為  $P_t$ ， $N \times L$  個分散式天線發送相同的信號， $M$  個 MS 終端天線接收信號。等功率分配時，通道容量為：

$$C = \log_2 \det \left[ I_M + \frac{\gamma}{NL} H H^* \right] \quad (10)$$

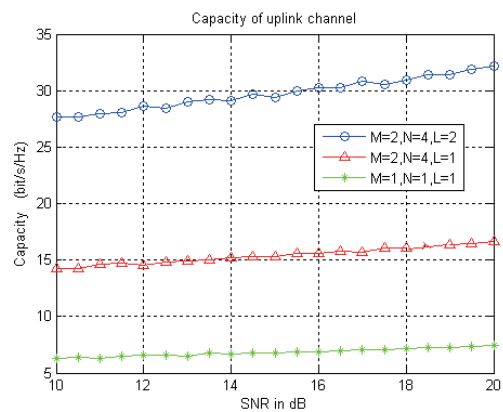
## 4 仿真結果和分析

首先分析了移動台以及社區端採用不同的天線數目配置時，系統的 Shannon 容量情況。仿真時假設通道矩陣  $H$  滿秩，每個社區的覆蓋半徑為 3km，MS 發射功率為 8w (以車載台為例)，Rician 衰落因數  $K=4$ ，載波頻率為 900MHz。在群社區內取幾個典型的地點，仿真整個群社區內的遍曆容量 (ergodic capacity)。圖四給出了 (2, 4, 2)，(2, 4, 1) 和 (1, 1, 1) 三種分散式 MIMO 通道的遍曆容量。其中 (1, 1, 1) 分散式 MIMO 通道相當於傳統的單基站覆蓋，單天線之間的點對點通信。隨著天線端天線數目的增加，通道容量基本上呈線性增加。但天線數的增加也增大了系統的複雜度，需要根據實際需求，設置天線的數目。



圖三 仿真測試點

Figure 3: Four selected sample sites inside a Group cell (i.e. A, B, C, and D)

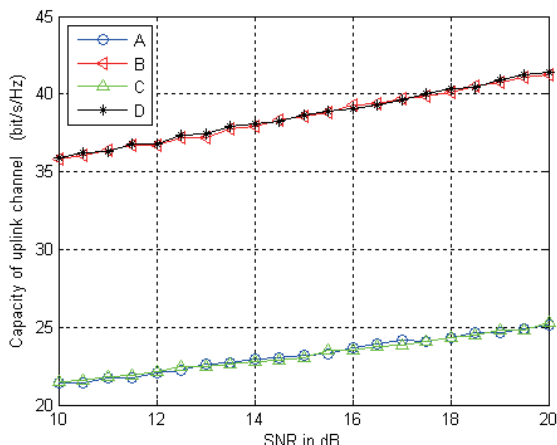


圖四 採用不同天線數目時的通道容量

Figure 4: Capacity of uplink channel for Distributed MIMO

如果對下行發送功率採用加權分配的策略，可以獲得更好的系統容量和覆蓋性能[6]。

從圖五中可以看出，在社區的交界處，通道的容量得到了很大的提升，甚至超越了靠近天線陣的地區。產生這一現象的原因是，在邊界地區，充分地利用了分散式天線和MIMO兩種技術，分別在一定程度上對抗了陰影衰落和小尺度衰落。容量的極大提高，可以充分降低發射功率，從而對解決高速率無線傳輸的電磁干擾問題有很大的幫助。



圖五 不同測試地點的通道容量

Figure 5: Comparison of channel capacities at different sample sites

而在傳統的蜂窩制社區通信系統中，社區的邊界處由於信號的衰落很大，往往得不到很好的無線網路覆蓋。分散式MIMO系統能夠在群社區內形成良好的系統覆蓋，解決群社區內的通信死角，提高通信服務品質。在現有的鐵路沿線網路覆蓋環境下，為了在社區的邊界處實現良好的通信環境，保證通信的可靠性，以及越區切換時的成功率，往往在小區間有一定的重疊區域，以實現無縫隙覆蓋。由圖五可以發現，採用分散式MIMO系統很好地解決了這一問題，在實際佈置基站的時候，群社區內的各社區之間就可以忽略重複覆蓋問題，或者，只需要很少的重複覆蓋區域，也提高了經濟效益。群社區之間為了安全地完成切換，可適當地設置重疊覆蓋的範圍。

## 5 群切換策略

列車在高速運行時，會引起多普勒頻移、通道變化速度快等現象，而鐵路運輸要求較高的通信品質，標準中要求越區切換的成功率必須高於99.5%，因此GSM-R系統要有很高的切換成功率和較短的切換處理時延。要想在高速環境中提高切換的成功率，在硬體條件無法滿足的情況下（執行過程所耗費的時間不會改變），從切換的過程設計和算法的角度設法降低觸發的過程和選擇過程的時間，加快切換的進程。

目前，越區切換的演算法[7]是：

$$EXP1 = RXLEV\_NCELL(n)$$

$$-[RxLev Min Cell(n) + \max(0, MST \times Pwr MaxCell(n) - p(n))] > 0 \quad (11)$$

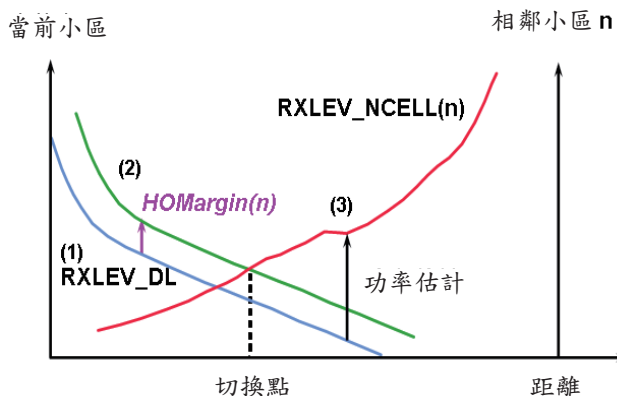
$$EXP2 = PBGT(n) - HOM arg in(n) > 0 \quad (12)$$

觸發切換的原因有多種，包括命令重試、捕獲切換、強迫切換、品質切換、電平切換、距離切換、功率估計切換和業務切換等。其中，功率估計切換可以使MS始終能和提供最高功率估計值的社區相連，具有更高的服務品質，降低了無線鏈路的失效率，因此在鐵路環境中廣為採用，大約60%的切換均為功率估計切換。移動台重新選擇一個新社區的時間可能非常長，尤其在客運專線中，車速很快，列車很快就穿越了重疊區進入了另一個社區。如果這時無線條件不太好的話就容易導致掉話現象的發生。為了避免這種現象的發生，一種方法是採用提前做切換決定[7]的方法。此時：

$$EXP2 = PBGT(n) - HOM arg in(n) - HOM arg in Ben(n) \quad (13)$$

其中，

$$PBGT(n) = RXLEV\_NCELL - RXLEV\_DL \quad (14)$$



圖六 功率估計切換

Figure 6: PBGT Handover

一種避免乒乓效應的方法是[7]，在社區中設置一個時間參數HOPingpangTimeRejection，若移動台剛做了一次切換，切入了一個新的社區，在這段時間內將不允許進行新的越區功率切換。但是，一旦啟用該參數，可能會引起掉話。

根據GSM-R網路沿鐵路線狀覆蓋的特點，可以將公網容納6個候選社區的鄰區列表簡化為2個（單網覆蓋）或4-5個（雙網覆蓋）。本文根據客運專線的高速環境，在功率估計切換演算法的基礎上，提出了一種改進的越區切換方案。這種方案避免了因列車高速運行切換不及時而導致的掉話現象，也在一定程度上減少了乒乓切換的次數。假設列車從群社區A進入群社區B，具體的切換演算法描述如下：

$$EXP2 = PBGT(n) - HOM arg in\_New(n) > 0 \quad (15)$$

其中，

$$HOM arg in\_New(n) = \begin{cases} HOM arg in(n) - offset1, A \rightarrow B \\ HOM arg in(n) - offset2, B \rightarrow A \end{cases} \quad (16)$$

設定一個速度門限 $speed\_threshold$ ，比如 $100km/h$ ，當列車速度超過此門限值時，門限值降為 $HOM\ argin(n)-offset1$ ，以鼓勵切換進行。一旦發生了越區切換，因某種原因需要從新社區切換回舊社區時，門限值提高為 $HOM\ argin(n)+offset2$ ，以抑制乒乓切換。 $offset1$ 和 $offset2$ 為門限偏置，單位為 $dB$ ，對於這兩個值的確定，需要在實際環境測量後獲得。

下面對原有的功率估計切換演算法和改進後的功率估計切換演算法進行仿真。各參數值設置如下：載頻為 $900MHz$ ，基站高度為 $100$ 米，MS高度為 $4$ 米，重疊區為 $500$ 米， $runHandover=1$ ，即切換判決週期為 $480ms$ ，平均視窗為 $1$ ，陰影衰落標準差 $\sigma_n=8dB$ ，單網覆蓋。

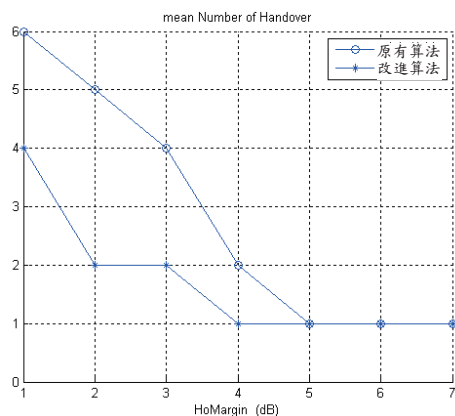
表1 切換仿真參數

載頻 $f$	900MHz
基站高度	100m
手持台高度	4m
列車速度	200km/h
重疊區	500m
判決週期	480ms
陰影衰落標準差	8dB
平均窗口	1
覆蓋類型	單網覆蓋

圖七顯示了列車運行速度為 $200km/h$ 時，原有切換演算法與改進切換演算法策略下，切換次數的比較。可以看出，改進的切換演算法減少了切換次數，且在更低的切換容限下達到了切換一次的要求，減少了高容限值造成的切換不及時問題。圖八描述了不同車速在兩種切換演算法下的越區切換率的比較。此處定義：

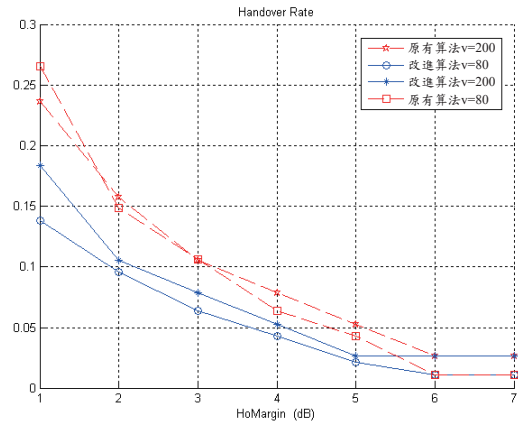
$$\text{越區切換率} = \frac{\text{切換次數}}{\text{切換判決次數}} \quad (17)$$

MS移動速度越快，相鄰兩次切換判決時的距離間隔越大，經歷的路徑損耗衰落可能就相差很大，因此切換概率增加。改進的切換演算法對不同的MS移動速度都降低了切換率，進而減輕了BSC及MSC的處理負擔。



圖七 兩種切換演算法下的切換次數比較

Figure 7: No. of handover when using new handover algorithm and general handover algorithm



圖八 兩種切換演算法下的切換率對比

Figure 8: Comparison of Handover rate

## 6 結論

本文針對客運專線高速運行環境，提出了使用群社區的組網結構解決頻繁越區切換問題，並建立了分散式MIMO通道模型，進行了仿真。仿真結果表明：分散式MIMO極大地提高了系統容量，減少了發射功率，解決了高速率無線傳輸的電磁干擾問題。提出了一種適合高速移動環境使用的切換演算法，減少了切換次數，並在一定程度上抑制了乒乓效應。

## 基金專案

軌道交通控制與安全國家重點實驗室（北京交通大學）開放課題基金資助，合同編號：SKL2008K007。

## 參考文獻

- [1] 何蓉、陳曉宇、張小津，*GSM-R雙網主備分擔方式下切換容限參數設置的研究*[J]，鐵道通信信號，Vol. 41，No. 11，2005，pp. 47-49。
- [2] 陶小峰、戴佐俊、唐超等，*廣義蜂窩結構及切換模式——群社區及群切換*[J]，電子學報，Vol. 32，No. 12A，2004，pp. 114-117。
- [3] Tao Xiaofeng, Ni Li, and Dai Zuojun, et al., "Intelligent Group Handover Mode in Multicell Infrastructure[C]," Proceedings of 14th IEEE Conference on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC2003), Vol. 1, Sep. 7-10, 2003, Beijing, China. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003, pp. 351-354.
- [4] 李漢強、郭偉、鄭輝，*分散式天線系統MIMO通道容量分析*[J]，通信學報，Vol. 26，No. 8，2005，pp. 134-138。
- [5] Foschini G. J., Gans M. J., "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas [J]," Wireless Personal Communication, Vol. 26, No. 3, 1998, 3, pp. 311-335.

- [6] 許曉東、陶小峰、吳春麗等，採用發送功率加權分配策略的群社區架構容量與覆蓋分析[J]，電子與資訊學報，Vol. 29，No.6，2007，pp.1271-1275。
- [7] 鐘章隊、李旭、蔣文怡，鐵路綜合數位移動通信系統[M]，北京：中國鐵道出版社，2003。

## 作者簡歷



楊義 (Yi Yang)，男，1984年出生於河北省徐水縣，2007年9月起攻讀北京交通大學碩士研究生，研究方向為無線寬頻通信與個人通信。



穀勇浩 (Yong-Hao Gu)，男，1980年出生於山西省太原市，北京郵電大學講師，研究方向為資訊安全、網路攻防。



吳昊 (Hao Wu)，女，1973年出生於河南省許昌市，北京交通大學現代通信研究所副教授/博士。2000年畢業於哈爾濱工業大學電子與通信工程系，獲通信與電子系統博士學位。目前研究方向主要為移動通信、GSM-R、移動ad hoc網路和寬頻無線通信。