

## 一种新型的基于基站协作的分布式 turbo 编码结构

许张生 朱近康

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系个人通信与扩频实验室 合肥 230027)

**摘要:** 该文提出了一种基于基站之间相互协作的分布式 turbo 编码(DTC)结构。它通过把编码后的数据流分别由多个不同基站同时发出,在不降低频谱利用率的前提下获得空间分集增益,从而提高的小区边界的用户的通信质量。由于可以在多个小区范围内分配资源,分布式编码结构也能提高在繁忙小区用户的资源分配成功率。针对提出的分布式 turbo 编码结构,文中给出了 5 种不同的具体实现方案,并分析了它们在非对称 AWGN 信道下的误码性能以及资源分配成功率。该文提出的编码结构和实现方案既适用于多基站系统,也适用于分布式基站系统。

**关键词:** 分布式 turbo 编码(DTC); 基站协作; 资源分配成功率; 空间分集

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-0875-05

## A Novel Distributed Turbo Coding Structure Based on Base Station Cooperation

Xu Zhang-sheng Zhu Jin-kang

(Dept. of EEIS, PCN & SS Lab., University of Sci. and Tech. of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** A Distributed Turbo Coding (DTC) structure based on Base Station (BS) cooperation is proposed in this paper. By transmitting the data after coding through several different BS, The spatial diversity gain can be obtained at the same bandwidth efficiency, thus the communication quality of the user can be enhanced in cell boundary. Because the resources are allocated among several cell range, distributed coding structure also can improve the resource alloc success probability of the users in heavy cell. Based on the DTC structure proposed in this paper, five different realizable schemes are given, and their BER performance and resource alloc success probability are analyzed in asymmetric AWGN channel. The coding structure and realizable schemes given in this paper can also be applied to multiple BS system and distributed BS system.

**Key words:** Distributed Turbo Coding (DTC); Base station cooperation; Resource alloc success probability; Spatial diversity

### 1 引言

在无线系统的上行链路中,用户之间两两合作是提供分集增益的有效手段之一<sup>[1]</sup>。也就是说,通过若干个移动台(MS)之间的相互协作,可以获得空间分集或者说“合作分集”增益<sup>[2]</sup>。在文献[1,2]中,使用了卷积信道编码,其纠错性能不及Berrou等提出的turbo码。由于turbo码采用基于概率的软判决迭代译码方法能达到接近Shannon极限的纠错能力,越来越广泛地应用到现代的通信系统中<sup>[3,4]</sup>。Zhao等将turbo码应用到中继系统的合作分集方案中,可以同时取得编码增益和分集增益<sup>[5]</sup>。另一方面,基于基站(BS)之间的相互协作, Kim H等提出了一种新型的软切换方案,它通过在两个BS同时发送不同穿孔图案的turbo码以提高在软切换时的频谱效率<sup>[6]</sup>。Kim B等给出了一个相似的软切换结构,并采用了

1/5 turbo码和互补式的穿孔图案<sup>[7]</sup>。

在移动通信系统中,高阶调制和高码率信道编码是提高用户信息速率基本而又有效的两个技术手段。在第三代移动通信系统WCDMA的release 5 方案中提出的HSDPA(High Speed Downlink Packet Access)技术,通过采用16QAM调制和最高码率接近1的RCPTC(Rate Compatible Punctured Turbo Code),可以达到最高14Mbps的数据速率<sup>[8,9]</sup>。由于无线信道的恶劣性和易变性,HSDPA中采用AMC(Adaptive Modulation and Coding)和Hybrid-ARQ技术来自适应地根据信道质量调整调制方式和编码速率,在高信噪比下有效地提高系统的频谱效率,而在低信噪比下能够降低速率以提供强大的纠错能力<sup>[10]</sup>。但是这会导致一个问题:处于恶劣位置的用户(例如用户移动到小区边界)如果需要有一定通信质量的较高的数据速率,那么他必须要申请更多的无线资源以降低编码速率及调制阶数。如果该用户要求的资源比较多或者他处于一个重负载小区,那么他的资源申请就往往会被拒

2005-09-19 收到, 2006-03-20 改回

国家自然科学基金(60572066)和国家 863 项目(2005AA123920)资助课题

绝。

本文提出了一种基于三基站之间协作的分布式 turbo 编码结构(DTC), 通过把 turbo 编码后数据分别由三基站同时发出, 引入空间分集或者说协作分集, 从而在不降低频谱利用率的前提下提高在小区边界用户的通信质量。DTC 在 3 个小区范围内申请信道资源, 可以显著提高在繁忙小区中用户或高速数据用户的资源分配成功率。

本文的安排如下: 第 2 节介绍系统与信道模型, 第 3 节介绍 DTC 的结构和几种具体实现方案, 第 4, 第 5 节分别为 DTC 资源分配成功率分析和误码性能的仿真, 最后是结束语。

## 2 DTC 系统模型及信道条件

本文中主要讨论位于小区边界的用户的性能, 考虑如图 1 中的系统模型。图中的 BSC 是基站控制器, 用来协调各个基站之间的行为。位于小区边界的用户一般都可以接收到比较强的邻小区的信号, 通常被认为是干扰, 本文中采用与软切换类似的思想, 让该用户和多个基站同时通信, 但是各基站发的是不同的信号, 这样可以在不降低频谱利用率的前提下, 额外获得空间分集增益。这种方法也不限于切换过程中, 任何可以接收多个基站信号的用户都可以使用。但是如果同时使用所有可检测到的基站信号, 那么 DTC 的性能将被信号最差的基站所限制, 所以必须选取那些信号足够强的基站来实现 DTC。这里, 以三基站的下行 DTC 结构为例进行研究, 其方法可以应用到不同基站数的方案中。为简化分析, 本文忽略各个无线链路的时延差别。

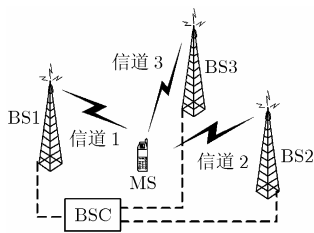


图 1 DTC 系统模型

本文讨论如下的信道模型:

$$y_i(j, k) = \sqrt{a_i(j)} \times x_i(j, k) + n_i(j, k), \quad i = 1, 2, 3, \\ j = 1, 2, \dots, \quad k = 1, 2, \dots, L_i \quad (1)$$

其中  $x_i(j, k)$  表示基站  $i$  在第  $j$  帧的第  $k$  个位置传送的符号,  $L_i$  是基站  $i$  在一帧的时间内所发出的符号数;  $n_i(j, k)$  是零均值, 每一维方差为  $N_0/2$  的复白高斯随机噪声;  $y_i(j, k)$  是移动台 (MS) 从基站  $i$  收到的符号。式(1)中的功率衰落因子  $a_i(j)$  用来调整各个基站与移动台之间的信噪比, 可以把它看作是无线环境下的大尺度衰落。本文假设  $a_i(j)$  在一帧内保持不变, 帧与帧之间独立变化, 并且接收方准确地知道  $a_i(j)$  值。因为对不同的基站  $i$ ,  $a_i(j)$  是独立变化的。本文把该信道模型称为非对称 AWGN 信道。

另外, 本文用现行的单发单收的 turbo 码作为 DTC 的性能参考, 其对应的信道模型为

$$y(j, k) = \sqrt{a(j)} \times x(j, k) + n(j, k), \quad j = 1, 2, \dots, \\ k = 1, 2, \dots, L_{\text{conv}} \quad (2)$$

由于只从一个基站发数据, 与式(1)相比, 没有了  $i$  这个变量。式中  $L_{\text{conv}}$  是基站在一帧时间内发出的符号数。

## 3 分布式 turbo 编码(DTC)结构

图 2 是一个典型的 1/3 turbo 码编码器结构框图, 信息序列  $u$  经过一个交织器, 形成一个新序列  $u_i$ 。  $u$  与  $u_i$  分别送给两个分量码编码器 ENC1 和 ENC2, 生成校验序列  $X^{1p}$  和  $X^{2p}$ 。校验比特序列和未编码序列(系统比特序列)经过复用后, 生成了 turbo 码序列  $X$ 。而 turbo 码译码器一般采用基于概率的软判决迭代译码方法, 可以达到接近 Shannon 极限的纠错能力。关于 turbo 码的公式推导以及其他知识, 可以参考文献[3,4,11]。

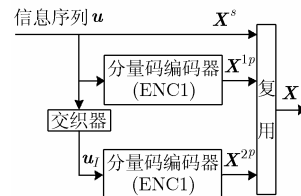


图 2 典型 1/3 turbo 码编码器结构框图

基于上述相关知识, 本文提出一种新型的分布式 turbo 编码结构, 如图 3 所示。其中的 turbo 编码器和解码器指的是典型的 turbo 编解码结构,  $S(j, k)$ ,  $P_1(j, k)$ ,  $P_2(j, k)$  分别是编码后的系统比特序列和第 1, 第 2 校验序列,  $j, k$  的含义同式(1)。与典型的 turbo 信道编码结构相比, DTC 增加了 1 个空间交织器, 并且交织器出来的 3 路序列分别由 3 个不同的基站发出, 在 MS 端, 将从 3 个基站接收到的 3 路序列集齐后, 经过解空间交织器处理再进行 turbo 码译码。

图 3 中的交织器之所以称之为空间交织器, 是因为 turbo 编码出来的 3 路序列经过它后只是交换了空间上的顺序, 但在时间上并没有被打乱。采用不同的空间交织器可以得到不同的 DTC 实现方案, 并导致不同的误码性能。本文中给出了 5 种 DTC 的具体实现方案, 分别如下:

在方案 1 中, 空间交织器里不做任何处理, 送往 3 个基站的  $x_1(j, k)$ ,  $x_2(j, k)$ ,  $x_3(j, k)$  分别就是编码后的  $S(j, k)$ ,  $P_1(j, k)$ ,  $P_2(j, k)$  3 路序列。在方案 2 中, 考虑到两路校验序列是对等关系, 把它们混合在一起再分为两路分别送给两个基站。由于混合后的校验序列要经过不同的信道, 方案 2 相当于平衡了两路校验序列所受到的信道衰落。方案 3 是在方案 2 基础上进一步引申, 将系统比特序列和两路校验序列混合在一起, 然后再分别送给 3 个基站。如果把交织器写成矩阵形式, 这 3 个方案的交织矩阵分别如下:

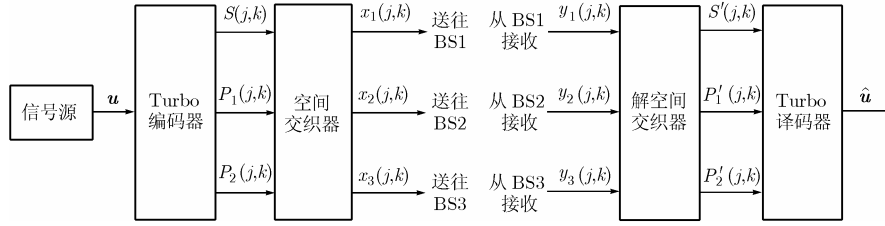


图 3 DTC 结构框图  
信道信息反馈

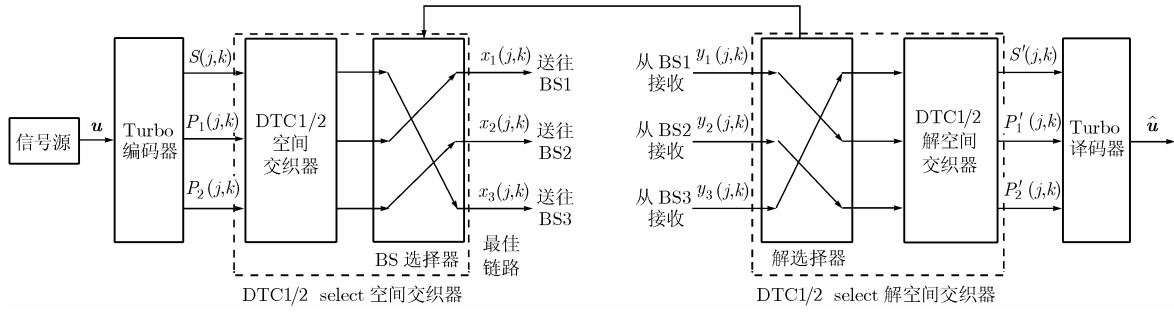


图 4 DTC 1/2 select 方案结构框图

$$\begin{aligned}
 \mathbf{I}_{\text{DTC1}} &= \begin{pmatrix} S(j,k) \\ P_1(j,k) \\ P_2(j,k) \end{pmatrix}, & \mathbf{I}_{\text{DTC2}} &= \begin{pmatrix} S(j,2k-1) & S(j,2k) \\ P_1(j,2k-1) & P_2(j,2k) \\ P_2(j,2k-1) & P_1(j,2k) \end{pmatrix}, \\
 \mathbf{I}_{\text{DTC3}} &= \begin{pmatrix} S(j,3k-2) & P_1(j,3k-1) & P_2(j,3k) \\ P_2(j,3k-2) & S(j,3k-1) & P_1(j,3k) \\ P_1(j,3k-2) & P_2(j,3k-1) & S(j,3k) \end{pmatrix} \quad (3)
 \end{aligned}$$

矩阵的各行分别对应于各基站发送的比特序列，各列对应于在第  $j$  帧的不同时刻发出的 3 个比特。

由于系统比特序列在译码过程中会影响两个分量码译码器，而两路校验序列各只影响一个分量码译码器，如果把 3 条无线链路中最好的一个分配给系统序列，可期望得到更好的纠错性能。因此本文在 DTC 方案 1 和方案 2 的空间交织器之后，增加了一个基站选择器，得到两个 DTC 选择性方案，分别叫做 DTC 1-select 和 DTC 2-select，如图 4 所示。基站选择器根据 MS 反馈的信道信息，把最好的链路分配给系统序列(图 4 中假设为基站 3 的链路为最佳链路)，而两路校验序列则随机选取另两条链路。

#### 4 DTC 资源分配成功率分析

##### 4.1 DTC 的资源分配成功率理论分析

DTC 的一个突出的优点就是可以提高用户的资源分配成功率，因为现行的信道编码结构是在同一个小区内分配所有的信道资源，而 DTC 是分别在 3 个小区内分配 1/3 的资源。假设每个小区有  $M$  个无线信道资源，而用户需要  $3p$  个；在小区  $i$  范围内，有  $x$  个信道空闲的概率记为  $\text{Id}_i(x)$ 。考虑如下 3 种情况：

(1) 现行编码结构，在一个小区内分配所有资源，这是目前最常用的方法。假设用户在各个小区内的概率是均等的，取 3 个小区内的资源分配成功率的平均值作为现行编码

结构的资源分配成功率：

$$\begin{aligned}
 S_{\text{traditional}} &= \frac{1}{3} \times \left( \left( 1 - \sum_{i1=0}^{3p-1} \text{Id}_1(i1) \right) + \left( 1 - \sum_{i2=0}^{3p-1} \text{Id}_2(i2) \right) \right. \\
 &\quad \left. + \left( 1 - \sum_{i3=0}^{3p-1} \text{Id}_3(i3) \right) \right) \quad (4)
 \end{aligned}$$

(2) DTC 结构，在每个小区固定分配所需资源的 1/3，即  $p$  个。

$$S_{\text{DTC}} = \left( 1 - \sum_{i1=0}^{p-1} \text{Id}_1(i1) \right) \left( 1 - \sum_{i2=0}^{p-1} \text{Id}_2(i2) \right) \left( 1 - \sum_{i3=0}^{p-1} \text{Id}_3(i3) \right) \quad (5)$$

(3) 改进型 DTC 结构，用户所需资源在 3 个小区范围内动态分配，如图 5 所示。其中  $p_1 + p_2 + p_3 = 3p$ ， $p_1, p_2, p_3 \geq 0$ ，

$$S_{\text{DTC\_enhance}} = 1 - \sum_{i1=0}^{3p-1} \sum_{i2=0}^{3p-1-i1} \sum_{i3=0}^{3p-1-i1-i2} \text{Id}_1(i1)\text{Id}_2(i2)\text{Id}_3(i3) \quad (6)$$

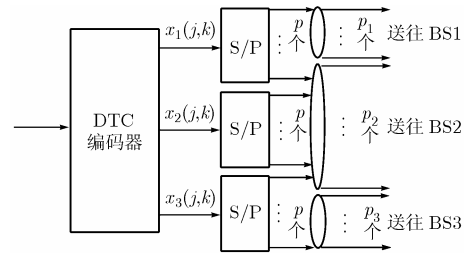


图 5 改进型 DTC 编码结构

从物理意义上看， $S_{\text{DTC}}$  是  $S_{\text{DTC\_enhance}}$  中的一项，所以有  $S_{\text{DTC\_enhance}} > S_{\text{DTC}}$ ； $S_{\text{traditional}}$  是  $S_{\text{DTC\_enhance}}$  中 3 项的平均值，所以有  $S_{\text{DTC\_enhance}} > S_{\text{traditional}}$ 。因此改进型 DTC 结构可以进一步提高 DTC 结构的资源分配成功率，当  $p_1, p_2, p_3$  中任两个为 0 时，改进型 DTC 结构就退化为现行编码结构，这对它的误码性能有一定影响，在第 5 节将详细分析之。而  $S_{\text{traditional}}$  与  $S_{\text{DTC}}$  之间的相互大小关系随着  $\text{Id}_i(x)$  的概率分

布不同而有所差别,因此只有在特定的系统条件下才能确定它们之间的大小关系。

4.2 DTC 的资源分配成功率比较

式(4)–式(6)中给出了 3 种不同的分配策略下的资源分配成功率的理论公式,这里分析一些具体的情况。假设  $M = 10$ ,在小区  $i$  中每个无线资源的空闲概率都相同,为  $h_i$ ,因此有

$$Id_i(k) = \binom{M}{k} h_i^k (1 - h_i)^{M-k}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

考虑以下两种情况:

(1)  $h_1 = h_2 = h_3$ , 即各个小区的负载是相同的。

在各小区负载相同的条件下,  $Id_1(k) = Id_2(k) = Id_3(k)$ 。从图 6 中可以看出,在  $p=1$  和  $p=3$  时,  $S_{DTC\_enhance}$  都是最高的,  $S_{DTC}$  次之,而现行编码结构的  $S_{traditional}$  最差。当  $p$  增大时,3 条曲线均向右移,但是 DTC 方案的两条曲线右移的幅度要小的多。当  $p=3$  时,可以看到 DTC 的两条曲线要明显优于现行的编码结构的曲线。

(2)  $h_1, h_2, h_3$  各不相同,即各个小区的负载是不同的。

为了便于研究,这里只考虑一种特殊情况,即  $h_1 = 2h_2 = 4h_3$ ,当  $h_3 > 0.25$  时,  $h_1 = 1$ ;当  $h_3 > 0.5$  时,  $h_2 = 1$ 。从图 7 中可以看出,在不同负载小区的情况下,  $S_{DTC\_enhance}$  仍然是最优的,而  $S_{traditional}$  依旧最差。当  $p$  增大时,3 条曲线均向右移,但是移动的幅度差别没有图 6 中那么明显。图 7 右边  $S_{traditional}$  曲线中出现的两个拐点对 3 个小区的资源分配成功率取平均造成的。

从上面的分析可知,如果采用 DTC 结构特别是改进型 DTC 结构,用户分配资源的成功率要比现行编码结构高的多。当小区的负载比较重( $h$  较小)或者用户要求的资源比较多( $p$  较大)时,这个优势更加明显。

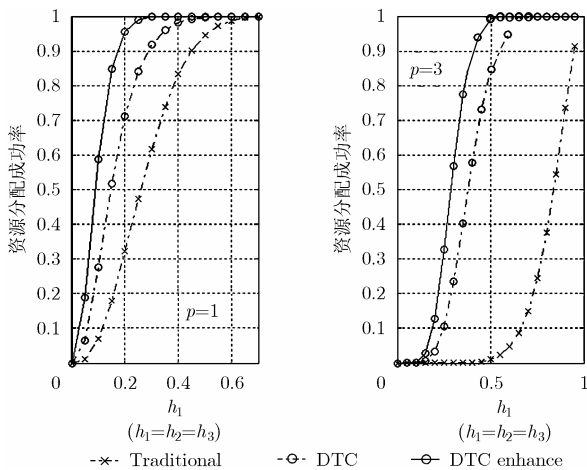


图 6 相同负载小区中,资源分配成功率与无线信道空闲概率  $h$  的关系曲线

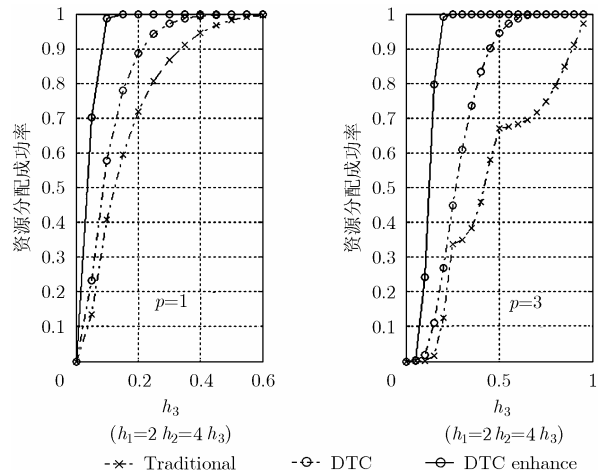


图 7 不同负载小区中,资源分配成功率与无线信道空闲概率  $h$  的关系曲线

5 DTC 误码性能仿真及分析

下面分析一下 DTC 的 5 种具体实现方案在非对称高斯信道下的误码性能,为了简化分析,这里取  $p = 1$ ,即用户只需要 3 个无线信道。本文采用了一个有 1024 长度的随机交织器的 1/3 turbo 码作为母码,5 次迭代,使用 log-MAP 算法。1/3 turbo 母码采用了 3GPP TS 25.212 协议中的编码方案。

5.1 DTC 在固定衰落非对称高斯信道下的误码性能

所谓固定衰落非对称高斯信道,是指  $a_i(j)$  只取有限的 3 个值,并随机分配给 3 个信道。当  $a_i(j)$  在每帧中只取 0.5,1,2 这 3 个值时,可以得到如图 8 所示的误码曲线。从图中可以看出, DTC1, DTC2 的曲线非常接近,而 DTC3 性能稍好,在  $BER < 10^{-5}$  区间内,比 DTC1, DTC2 至少有 0.3dB 的优势,这是因为 DTC3 平衡了 3 路比特的信噪比,不会因为某一路特别差而降低性能太多,因此当 3 个信道差别越大时, DTC3 的优势就越明显。图 8 中的 1/3 turbo normal 曲线是把式(2)中的  $a(j)$  固定为 1 得到的,它是 turbo 码在 AWGN 信道下的误码性能曲线。1/3 turbo average 曲线是  $a(j)$  分别等于 0.5,1,2 时的 BER 性能再做平均得到的,对应于现行编码结构没有使用软切换技术时,在非对称高斯信道下的误码曲线。与 average 曲线相比,在  $BER = 10^{-5}$  时,性能最好的 DTC3 方案有 3.5dB 左右的增益。

由 DTC1 和 DTC2 变化而来的 DTC1-select 和 DTC2-select 两条曲线也是非常的接近,不过与 DTC1, DTC2 相比,select 方案在低信噪比时性能稍好,但在高信噪比时

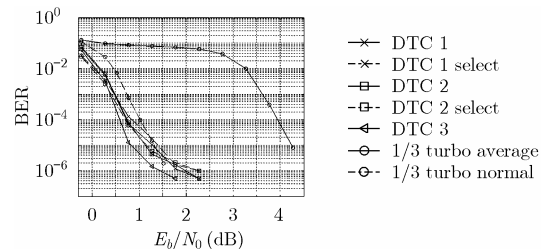


图 8 信道功率衰落为 0.5,1,2 时, DTC 的误码性能曲线

反而劣于DTC1, DTC2。这是因为: turbo码的自由距离码字主要由汉明重量为2的输入序列产生, 这些码字限制了高信噪比条件下turbo码的性能。在均匀随机交织条件下, 对于重量为2的输入序列, 分量码的输出校验重量大于信息重量, 如果分配给校验序列的功率多些或者把信噪比高的信道分配给校验序列, 则可以增加低重码字与全零码字之间的欧氏距离, 从而对性能有所改善。当信噪比较小时, 次最优的迭代译码算法的性能主要依赖于系统比特信息, 则应该“优待”系统比特<sup>[12]</sup>。由于select方案只有在低信噪比时才优于一般的DTC方案, 而此时BER在 $10^{-2}$ 量级, 这在数据通信中是不可接受的, 并且select方案需要接收方反馈信道信息, 因此无论从高信噪比时的性能还是从实现复杂度上看, select方案都不及一般的DTC方案。

### 5.2 DTC 在随机衰落非对称高斯信道下的误码性能

随机衰落非对称高斯信道是指式(1)中的 $a_i(j)$ 是一个随机变量, 这时信道相当于一个慢衰落信道。本文中把 $a_i(j)$ 看作是由于大尺度衰落引起的, 为了简化分析, 这里假设功率衰落因子 $a_i(j)$ 是一个在 $[0.5, 1.5]$ 区间上的均匀分布的随机变量, 对于其他分布, 分析方法是类似的。图9是在这种随机信道下的DTC误码性能曲线。

如图9所示, DTC1, DTC2, DTC3以及两种select方案的性能曲线之间的相互关系与图8相似。1/3 turbo average曲线是式(2)中的 $a(j)$ 在 $[0.5, 1.5]$ 区间上的均匀分布时误码率的平均曲线, 也就是现行编码结构在没有使用软切换技术时, 在随机衰落非对称高斯信道下的误码曲线。而normal曲线仍然是 $a(j)$ 固定为1时的误码曲线。在 $BER = 10^{-5}$ 时, 与average曲线相比, DTC3方案大概有0.70dB的增益, 但是它比normal曲线差了近1.7dB。这是因为在normal曲线中,  $a(j)$ 固定为1, 而此时DTC结构的误码曲线主要取决于3个基站的 $a_i(j)$ 都小于1时的情况即最差情况, 这导致DTC曲线比normal曲线差。

软切换技术是指小区边界用户同时测量各基站的信号质量, 并选取最佳信道传送所有数据, 其误码性能相当于图8中的normal曲线左移 $3\text{dB} (= 10\lg 2)$ , 图9中的SHO(Soft HandOver)曲线。就误码性能来说, 本文中的DTC结构不及软切换, 但是当3条链路的信道质量相差不大时, 它们的差距随着信噪比增大而减小, 如图9所示。但是软切换方案的资源分配成功率只是图6, 图7中traditional曲线, 对于重负载小区中的用户或高数据率用户, 其分配成功率远低于DTC结构, 并且切换过程中还要占用额外的系统资源。另外, 现行编码结构如果没有软切换技术, 其误码性能是图8, 图9中的average曲线, 不如其中的DTC曲线。因此, 可

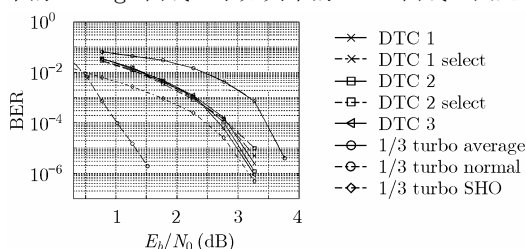


图9 随机信道衰落时, DTC 的误码性能曲线

以认为 DTC 结构是在资源分配成功率和误码性能之间的一个折衷。

## 6 结束语

本文提出了基于基站之间互相协作的一种分布式 turbo 编码结构。DTC 系统将编码后的比特序列通过一个空间交织器再由3个基站分别同时发送给终端用户, 从而获得空间分集增益, 并可实现在3个小区范围内分配信道资源。仿真结果表明, 本文提出的 DTC 结构与现行的编码结构相比, 在资源分配成功率和误码性能上均有一定的优势, 与软切换技术相比, DTC 结构是对资源分配成功率和误码性能的一个很好折衷。由仿真得知, DTC 5种具体实现方案中, DTC 3方案在性能上是最好的, 并且不需反馈任何信道信息, 是最有实用价值的方案。

## 参考文献

- [1] Hunter T E and Nosratinia A. Cooperation diversity through coding. in Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory, Lausanne, Switzerland, June 2002: 220-220.
- [2] Stefanov A and Erkip E. Cooperative coding for wireless networks. *IEEE Trans. on Commun.*, 2004, 52(9): 1470-1476.
- [3] Berrou C, Glavieux A, and Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. in ICC'93, Geneva, Switzerland, May 1993: 1064-1070.
- [4] 王新梅, 肖国镇. 纠错码——原理与方法(修订版). 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 504-534.
- [5] Zhao B and Valenti M C. Distributed turbo coded diversity for relay channel. *Electronics Letters*, 2003, 39(10): 786-787.
- [6] Kim Hasung and Stuber G L. An adaptive packet soft handoff scheme based on punctured turbo coding. in 5th Int. Symp. Wireless Personal Multimedia Commu., Honolulu, Hawaii, Oct. 2002, vol. 1: 57-61.
- [7] Kim Bonghone and Kwon Sung Lark. A new soft handover scheme using punctured turbo codes in the wideband CDMA system. in IEEE VTC 2001 Spring, Vehicular Technology Conference, Rhodes, Greece, May 2001, vol. 2: 1420-1424.
- [8] 3GPP TS 25.212. Multiplexing and channel coding (FDD). V5.9.0 (2004-06): 57-69.
- [9] 3GPP TR 25.848. Physical layer aspects of ultra high speed downlink packet access. V4.0.0 (2001-03): 7-18.
- [10] Rowitch D N and Milstein L B. On the performance of hybrid FEC/ARQ systems using rate compatible punctured turbo (RCPT) codes. *IEEE Trans. on Commun.*, 2000, 48(6): 948-959.
- [11] 刘东华. Turbo 码原理与应用技术. 北京: 电子工业出版社, 2004: 68-125.
- [12] 刘东华. Turbo 码原理与应用技术. 北京: 电子工业出版社, 2004: 176-180.

许张生: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为信道编译码、空时码等。

朱近康: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信及个人通信、扩频通信、信号处理等。