

空时分组编码用于提高系统容量的研究¹

刘 勤 杨家玮 李建东

(西安电子科技大学综合业务网理论和关键技术国家重点实验室
信息科学研究所宽带无线通信实验室 西安 710071)

摘 要: 该文在简单介绍空时分组编码的基础上,着重研究了对共道用户产生的干扰进行抵消抑制的技术。采用干扰抵消技术可以充分利用干扰信号的相关性进行有效的抵消处理,从增加共道用户的角度提高了系统的容量。并且文中提出了一种利用不同调制方式性能的不同,对共道用户进行分步解码来削弱共道干扰的空时分组编码传输系统策略。这种方法能够进一步提高系统的性能,尤其是增大了通信系统的容量。

关键词: 系统容量,空时编码,抗干扰技术

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)10-1562-07

Study on Using Space-Time Block Coding to Improve System Capacity

Liu Qin Yang Jia-wei Li Jian-dong

(Broadband Wireless Communication Laboratory, Information Science Institute,
State key Lab of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract This paper focuses on the anti-interference technique to restrain the interference of co-channel users while simply introducing the concept of space-time block coding. Anti-interference technique uses the relationship among signals to remove the interference, which can enhance the capacity of communication system by introducing co-channel users. Moreover, the paper submits a strategy to eliminate the effect of co-channel interference by decoding signals by stages while using different performance of various modulation techniques. The system performance can get more enhancements by using this strategy, which is very important for enlarging the capacity of system.

Key words System capacity, Space-time coding, Anti-interference technique

1 引言

在未来的通信中,随着移动用户的增多,以及人们对移动通信业务的要求已从单纯的语音业务扩展到多媒体业务,频谱资源就显得日趋紧张,从而也限制了通信系统的容量。因此追求尽可能高的频谱利用率以扩充系统容量已成为并且在今后仍然是一个充满挑战性的问题。这种挑战使得人们努力开发高效的编码、调制以及信号处理技术来提高无线频谱的效率。而近年来提出的空时码就是有效提高无线频谱利用率的重要技术之一,这种技术已经应用在第三代移动通信方案中。

自从 Alamouti 提出结合空时分组编码的发射分集^[1]概念之后, Vahid Tarokh, Ayman Naguib, Nambi Seshadri 等人在空时码的研究中作了大量的工作^[2,3]。所有的分析和仿真结果都表明,空时码频率利用率可达 $20\sim 40\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ ^[4],具有良好的性能。可以预料,应用空时码

¹ 2003-03-19 收到, 2004-01-13 改回

国家自然科学基金和微软亚洲研究院联合项目(60372048),高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划,国家自然科学基金重大项目(60390540)第6子课题,国家863计划重大课题(2001AA123031)和教育部科学技术研究重点项目(01162)资助项目

的未来移动通信系统将具有更大的系统容量、更好的通信质量和更高的频率利用率。本文对如何利用空时分组编码系统的抗干扰技术来提高通信系统的容量方面作了研究，提出了一种引入多个共道用户的扩容方案，并且利用分步协同解码的抗干扰策略，将多个共道用户间的干扰影响降低，保证了扩容系统的通信质量。

2 空时分组编码

空时分组码是一种基于发射分集的编码技术，图 1 以两部发射天线一部接收天线的系统示意了简单的基带空时分组码发射机和接收机的结构原理。

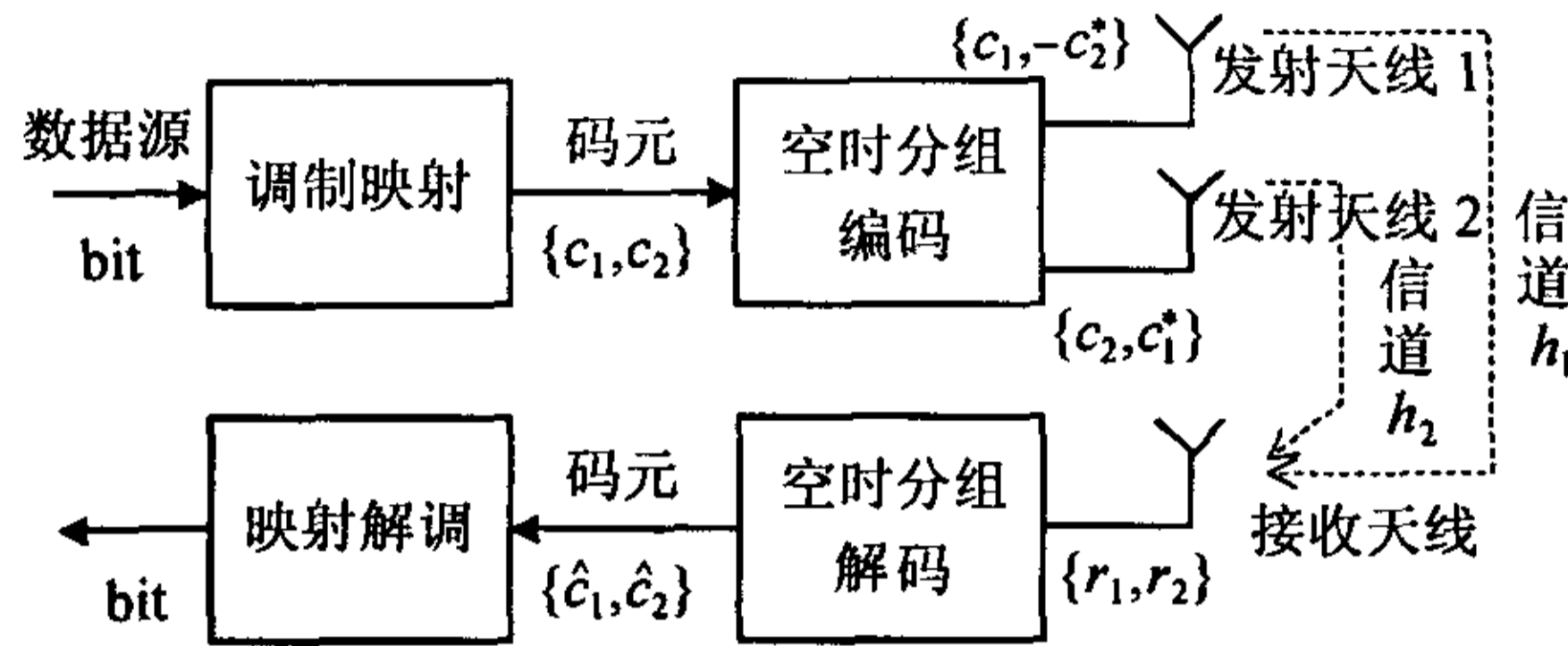


图 1 空时分组编码系统发射机和接收机的结构图

在发射端输入的比特经过调制映射后成为码元。这些码元每两个划分为一组，然后以组为单位进行空时编码。经过编码后的码元以并行的两列分别经由两部发射天线传输。假设其中任意一组码元为 $\{c_1, c_2\}$ ，那么经过空时分组编码后的并行两列码元分别为 $\{c_1, -c_2^*\}$ 和 $\{c_2, c_1^*\}$ ，其中 c_i^* 表示码元 c_i 的共轭。这两列码元数据按序分别由发射天线 1 和发射天线 2 依次发送。

在传输过程中一般可以认为信道状态信息 (Channel State Information, CSI) 对接收端是已知的。这可以采用发送导频序列等信道估计算法来得到^[2,5]。我们用 h_1 表示发射天线 1 到接收天线的信道，用 h_2 表示发射天线 2 到接收天线的信道，假设信道 $h_i (i = 1, 2)$ 为平坦瑞利衰落，其方差为 1，均值为 0，并且假设在一组数据的传输过程中信道状态不变，即有

$$h_i(nT) = h_i((n + 1)T) \tag{1}$$

以 r_1 表示接收天线在前一个码元时段的接收信号，以 r_2 表示接收天线在后一个码元时段的接收信号，那么有

$$r_1 = h_1 c_1 + h_2 c_2 + n_1 \tag{2}$$

$$r_2 = -h_1 c_2^* + h_2 c_1^* + n_2 \tag{3}$$

其中 n_1 和 n_2 表示互不相干的加性高斯白噪声 (AWGN)，均值为 0，功率谱为 N_0 。

如果设定接收信号矢量 $r = [r_1, r_2^*]^T$ ，码元矢量 $c = [c_1, c_2]^T$ ，噪声矢量为 $n = [n_1, n_2^*]^T$ ， $[\cdot]^T$ 为转置算子，那么式 (2) 和式 (3) 可以表示为

$$r = H \cdot c + n \tag{4}$$

其中信道矩阵 H 被定义为

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \tag{5}$$

设码元组 $\{c_1, c_2\}$ 的集合定义为 C_{clus} ，并且假设不同的码元组是等概率出现的，那么在接收端的解码部分可以采用最大似然 (ML) 解码，它表示为

$$\hat{c} = \arg \min_{\hat{c} \in C_{clus}} \|r - H \cdot \hat{c}\|^2 \tag{6}$$

其中 \hat{c} 表示 c 的判决值。可以观察到

$$H^* H = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \cdot I_2 \tag{7}$$

其中 I_n 是 $n \times n$ 单位矩阵。那么式 (4) 可以作如下变化:

$$\tilde{r} = H^* \cdot r = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \cdot c + \tilde{n} \tag{8}$$

在此 $\tilde{n} = H^* \cdot n$ 。那么有

$$\hat{c} = \arg \min_{\hat{c} \in C_{clus}} \|\tilde{r} - (|h_1|^2 + |h_2|^2) \cdot \hat{c}\|^2 \tag{9}$$

如果接收天线不只有 1 个, 而是有 M 个, 这种解码方式仍然适用。此时第 m 个天线的接收矢量可以表示为

$$r_m = H_m \cdot c + n_m \tag{10}$$

其中 H_m 是从两个发射天线到接收天线 m 的信道矩阵:

$$H_m = \begin{bmatrix} h_{1m} & h_{2m} \\ h_{2m}^* & -h_{1m}^* \end{bmatrix} \tag{11}$$

n_m 是接收天线 m 处的噪声矢量。在此情况下, 最大似然解码规则为

$$\hat{c} = \arg \min_{\hat{c} \in C_{clus}} \sum_{m=1}^M \|r_m - H_m \cdot \hat{c}\|^2 \tag{12}$$

3 引入共道用户的扩容方法

为了提高系统的容量, 我们采用增加共道用户的方法, 即在同一频带上同一时间中让两个或更多的用户进行通信。这样在提高系统容量的同时, 为了保证通信的质量, 还要对信号之间的干扰加以处理。我们将系统容量扩大为原先的两倍为例, 即在同一信道中引入一个共道用户。假设这时两个用户分别为用户 a 与用户 b, 其中每个用户均采用上述的空时分组编码方式。接收端有两个接收天线, 系统如图 2 所示。

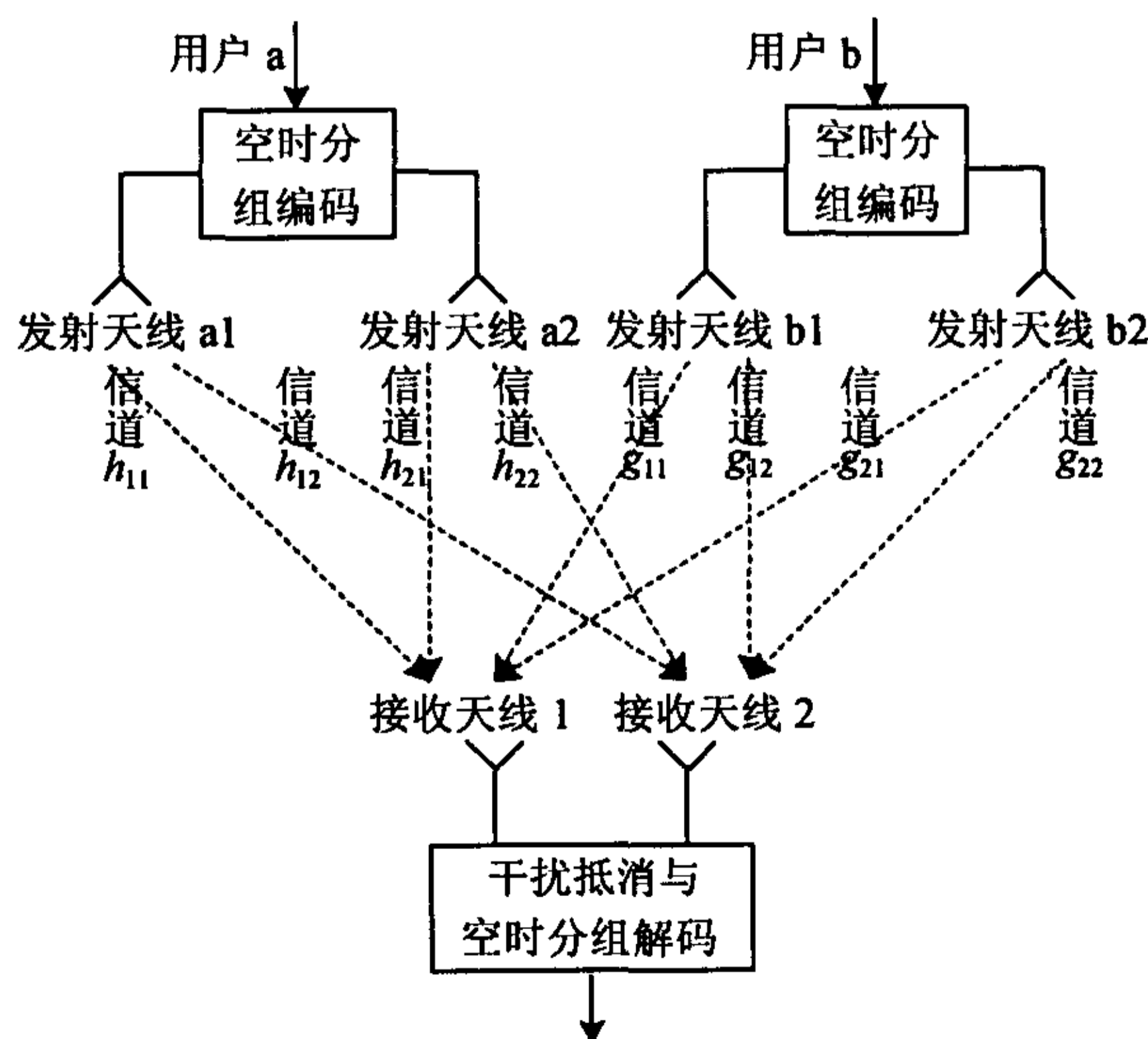


图 2 两共道用户空时系统

如果以 h_{ij} 表示用户 a 的天线 i 与接收天线 j 间的信道, 以 g_{ij} 表示用户 b 的天线 i 与接收天线 j 间的信道, 并且假设用户 a 进行编码的码元组为 $\{c_1, c_2\}$, 用户 b 进行编码的码元组为 $\{s_1, s_2\}$, 那么可以得到接收天线 1 在对应的两个码元周期的接收信号为

$$r_{11} = h_{11}c_1 + h_{21}c_2 + g_{11}s_1 + g_{21}s_2 + n_{11} \quad (13)$$

$$r_{12} = -h_{11}c_2^* + h_{21}c_1^* - g_{11}s_2^* + g_{21}s_1^* + n_{12} \quad (14)$$

其中 n_{11} 与 n_{12} 是接收天线 1 在对应码元时段的噪声.

同样可以得到接收天线 2 在对应的码元周期的接收信号为

$$r_{21} = h_{12}c_1 + h_{22}c_2 + g_{12}s_1 + g_{22}s_2 + n_{21} \quad (15)$$

$$r_{22} = -h_{12}c_2^* + h_{22}c_1^* - g_{12}s_2^* + g_{22}s_1^* + n_{22} \quad (16)$$

n_{21} 与 n_{22} 是接收天线 2 在对应码元时段噪声.

可以看出, 当存在共道干扰用户的情况下, 在接收信号中不同用户发送的信息已经混淆在一起. 如果仍是按照上述的基本解码方式来处理, 干扰信号被视作噪声. 这样系统性能就会大幅度下降, 无法保证正常的通信. 因此, 为了消除不同共道空时用户间的干扰, 就必须利用干扰抵消 (Interference Cancellation, IC) 算法来处理.

我们将接收信号用矩阵形式表示, 定义矢量 $r_1 = [r_{11} \ r_{12}^*]^T$, $r_2 = [r_{21} \ r_{22}^*]^T$, $c = [c_1 \ c_2]^T$, $s = [s_1 \ s_2]^T$, $n_1 = [n_{11} \ n_{12}^*]^T$, $n_2 = [n_{21} \ n_{22}^*]^T$, 那么以上诸式可以表示为

$$r_1 = H_1 \cdot c + G_1 \cdot s + n_1 \quad (17)$$

$$r_2 = H_2 \cdot c + G_2 \cdot s + n_2 \quad (18)$$

其中矩阵 H_1 , H_2 , G_1 与 G_2 分别为

$$H_1 = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{21}^* & -h_{11}^* \end{bmatrix}, \quad G_1 = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{21} \\ g_{21}^* & -g_{11}^* \end{bmatrix}, \quad H_2 = \begin{bmatrix} h_{12} & h_{22} \\ h_{22}^* & -h_{12}^* \end{bmatrix}, \quad G_2 = \begin{bmatrix} g_{12} & g_{22} \\ g_{22}^* & -g_{12}^* \end{bmatrix}$$

如果将式 (17) 与式 (18) 合并在一起表示, 得到

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 & G_1 \\ H_2 & G_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

现在我们对上式两边同乘以相同因子 $F = \begin{bmatrix} I_2 & -G_1G_2^{-1} \\ -H_2H_1^{-1} & I_2 \end{bmatrix}$, 得

$$\begin{aligned} F \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} &= F \begin{bmatrix} H_1 & G_1 \\ H_2 & G_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ s \end{bmatrix} + F \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} H_1 - G_1G_2^{-1}H_2 & 0 \\ 0 & G_2 - H_2H_1^{-1}G_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 - G_1G_2^{-1}n_2 \\ n_2 - H_2H_1^{-1}n_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

这样就可以得到如下两式:

$$(r_1 - G_1G_2^{-1}r_2) = (H_1 - G_1G_2^{-1}H_2)c + (n_1 - G_1G_2^{-1}n_2) \quad (21)$$

$$(r_2 - H_2H_1^{-1}r_1) = (G_2 - H_2H_1^{-1}G_1)s + (n_2 - H_2H_1^{-1}n_1) \quad (22)$$

将这两式与式 (4) 比较, 可以看出在此时利用最大似然解码算法解码, 就可以分别得到所求的判决值 \hat{c} 与 \hat{s} .

此方法可以扩展至引入多个共道用户的情况。采用这种方法可以将系统的容量提高数倍。文献 [6] 指出，在系统具有 L 个共道用户时，为了良好的数据通信，接收端的天线个数 M 应该大于或等于 L 。

4 扩容系统中分步解码的抗干扰策略

单纯的干扰抵消算法如同以上介绍的那样，立足点往往是单个用户的处理，这样就没有充分考虑系统内多个共道信号之间的联系。在接收端对每个用户都分别采用干扰抵消算法来消除干扰信号的影响，这样用户的干扰抵消和解码过程是相互独立的。实际上，接收端可以将所有共道用户看作一个整体，充分利用用户间的联系进行分步解码。以下以具有两个不同调制方式的共道空时用户系统为例作以说明。

如图 3 所示，如果假设在发射端用户 a 和用户 b 采用不同的调制方式，对调制后的码元 c 与 s 分别进行空时分组编码，并各自经过两个天线发射。

在接收端如果两用户的信噪比相同，在没有其它条件的前提下，用户的误码性能是由其调制方式决定的。在调制映射的星座图上，不同的调制方式具有不同的映射点间距离，点间距离越大，其抗噪声性能就越好。对比用户 a 和用户 b 的调制方式，就能够确知其中性能相对较好的一个。不失一般性，假设用户 a 的调制阶数较低，相对的其性能也较好。那么在接收端将以用户 a 为切入点，首先求解它的信号 c 。

接收端收到的信号矢量仍表示为 r_1 与 r_2 ，那么式 (19) 也可以表示此时接收端的状态。对用户 a 来说，沿用上一节解法，通过式 (21) 的干扰抵消算法和最大似然解码算法，可以得到它的判决信号 \hat{c} 。在此，我们认为这个判决信号 \hat{c} 为“准正确码”，并且将之反馈作用于接收信号。由于信道的状态信息 H_1 和 H_2 完全已知，则可以从接收信号 r_1, r_2 中减去用户 a 信号部分，余下的即为用户 b 发射信号的无干扰传输结果。这样有

$$r_1 - H_1 \cdot \hat{c} = G_1 \cdot s + n_1 \tag{23}$$

$$r_2 - H_2 \cdot \hat{c} = G_2 \cdot s + n_2 \tag{24}$$

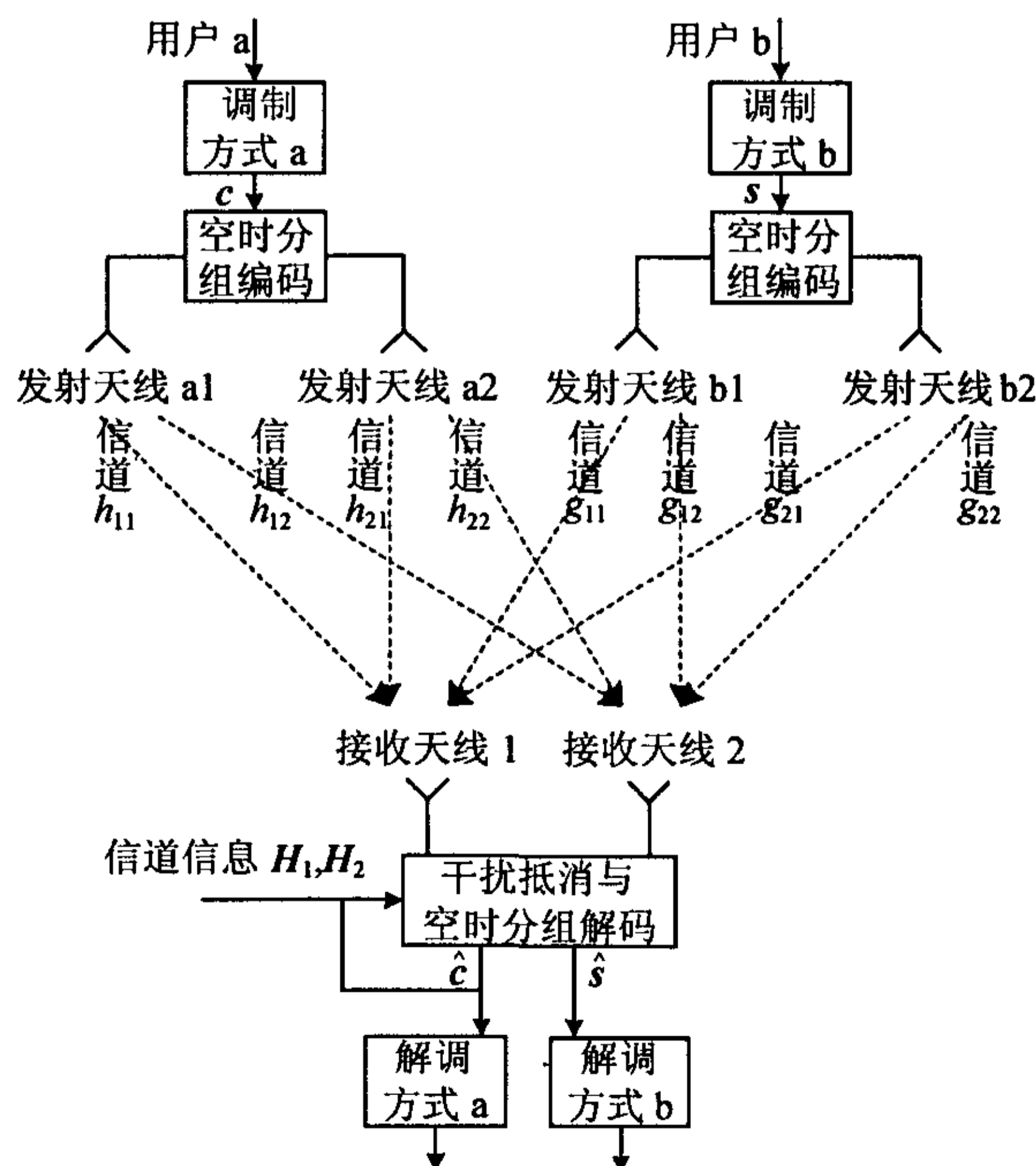


图 3 两共道用户系统分步解码策略

然后对此两式合并, 得到下式:

$$(\mathbf{r}_1 - \mathbf{H}_1 \cdot \hat{\mathbf{c}}) + (\mathbf{r}_2 - \mathbf{H}_2 \cdot \hat{\mathbf{c}}) = (\mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2) \cdot \mathbf{s} + (\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2) \quad (25)$$

对它进行最大似然解码, 就可以得到用户 b 的判决信号 $\hat{\mathbf{s}}$ 。

这种策略利用不同调制方式用户通信质量的差异, 首先解得性能最佳的用户, 再从接收信号中去除此用户的影响, 然后再在此结果中处理剩余用户。这样就在保证大幅度提高通信系统容量的同时进一步提高了各个用户的通信性能。这种策略也可以扩展到具有多个共道用户的扩容系统情况。

5 仿真及结果分析

在理论分析的基础上, 我们对以上所涉及的几种情况进行了仿真研究。在仿真中, 假设信道为平坦瑞利衰落, 并且信道的状态信息对于接收端已知。同时也设定每个用户都采用上述分组长度为 2 的空时分组编码, 并且各自通过两个发射天线传输。

首先, 我们仿真系统中不存在共道干扰, 即只有单个用户的情况。如果采用的调制方式分别为 BPSK 与 QPSK, 在接收端具有不同接收天线数目的情况下, 仿真结果如图 4。

从图 4 中可以看到, 对于相同的调制方式, 如果接收天线越多, 系统的传输性能越佳。从理论上, 当接收天线足够多时, 系统可以达到无损传输^[7]。另一方面, 当接收天线数目相同时, 采用 BPSK 调制的系统比采用 QPSK 调制的系统性能好。这是因为, BPSK 调制的星座图中映射点间距较 QPSK 调制的间距大, 因而相对的 BPSK 调制系统的抗噪声性能更佳。通过此结果也得到了空时分组编码系统的抗噪声性能与星座映射点间距有关的具体表现。

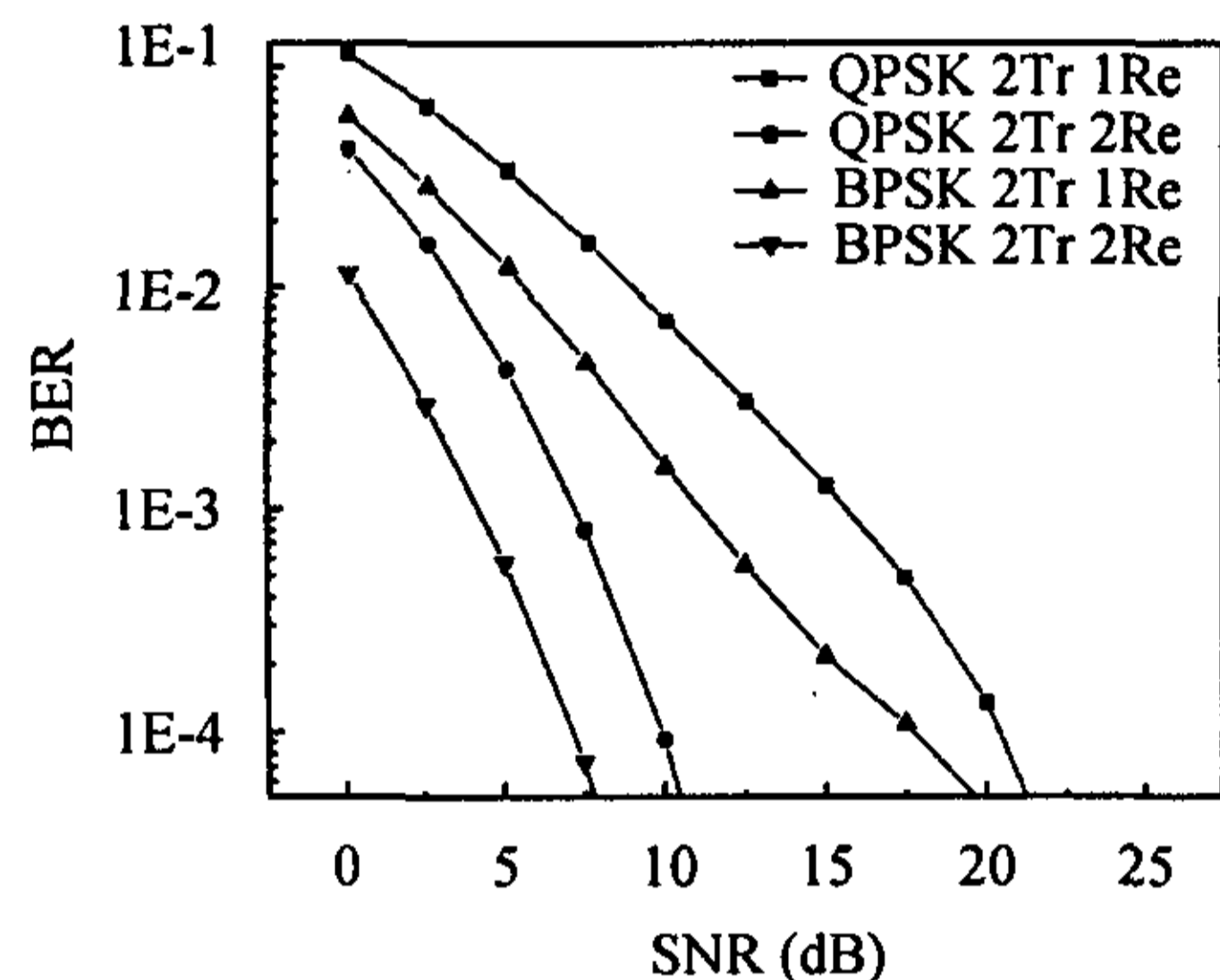


图 4 无共道干扰情况

为了提高系统的容量, 在系统中引入共道用户, 对此进行了另一组仿真。假设引入了一个共道用户, 这样系统的容量提高了一倍。设在接收端每个用户的信号功率相同, 即在接收端任意一个用户的信干比为 0 dB。在接收端用两个天线接收的情况下, 我们对系统在采用或者不采用干扰抵消 (IC) 机制进行了仿真, 得到的结果如下。

在两用户采用同种调制方式时, 如图 5。若不采用干扰抵消机制, 共道干扰就按照噪声处理, 那么接收端的信噪比就会小于 0 dB。这种情况下的通信环境非常恶劣, 通信的质量也就较差。如果采用干扰抵消机制, 接收端充分利用接收信号之间的相干性, 对相互纠缠在一起的两组信号进行抵消, 借此排除了干扰信号的影响。此时影响通信的因素只有噪声, 这样通信的质量就会大大提高。从图中可以明显看出, 采用干扰抵消机制后的系统性能远好于未采用干扰抵消机制的系统。尤其当噪声较小的情况下, 进行或者不进行干扰抵消就造成了系统通信性能极大的差异。

图 6 中表示的仍是对两个共道用户系统性能的仿真结果, 不过两用户具有不同的调制方式。其中用户 a 采用 BPSK 调制; 用户 b 采用 QPSK 调制。在图中, 第 1 组曲线是在接收端对两信号的直接解码结果, 第 2 组曲线是引入干扰抵消机制后系统的性能。从图中可以看出采用 BPSK 调制用户的性能仍然优于采用 QPSK 调制的用户。在第 3 组仿真中, 采用分步解码的策略对两用户进行解码。首先对用户 a 的 BPSK 调制信号解码, 采用干扰抵消与最大似然解码结合的方法。在解码判决用户 a 的码元后将其反馈至接收端, 然后再从接收信号中除去这部分的信号影响。这样就得到了用户 b 信号的作用分量, 然后对它单独解码。从第 3 组曲线的结果可以看出引入共道用户后, 采用干扰抵消的方法是必须的, 而且分步解码的干扰抵消策略能够进

一步提高系统的性能。此时在保持用户 a 的通信性能的情况下, 用户 b 能够得到近 5 dB 的增益。

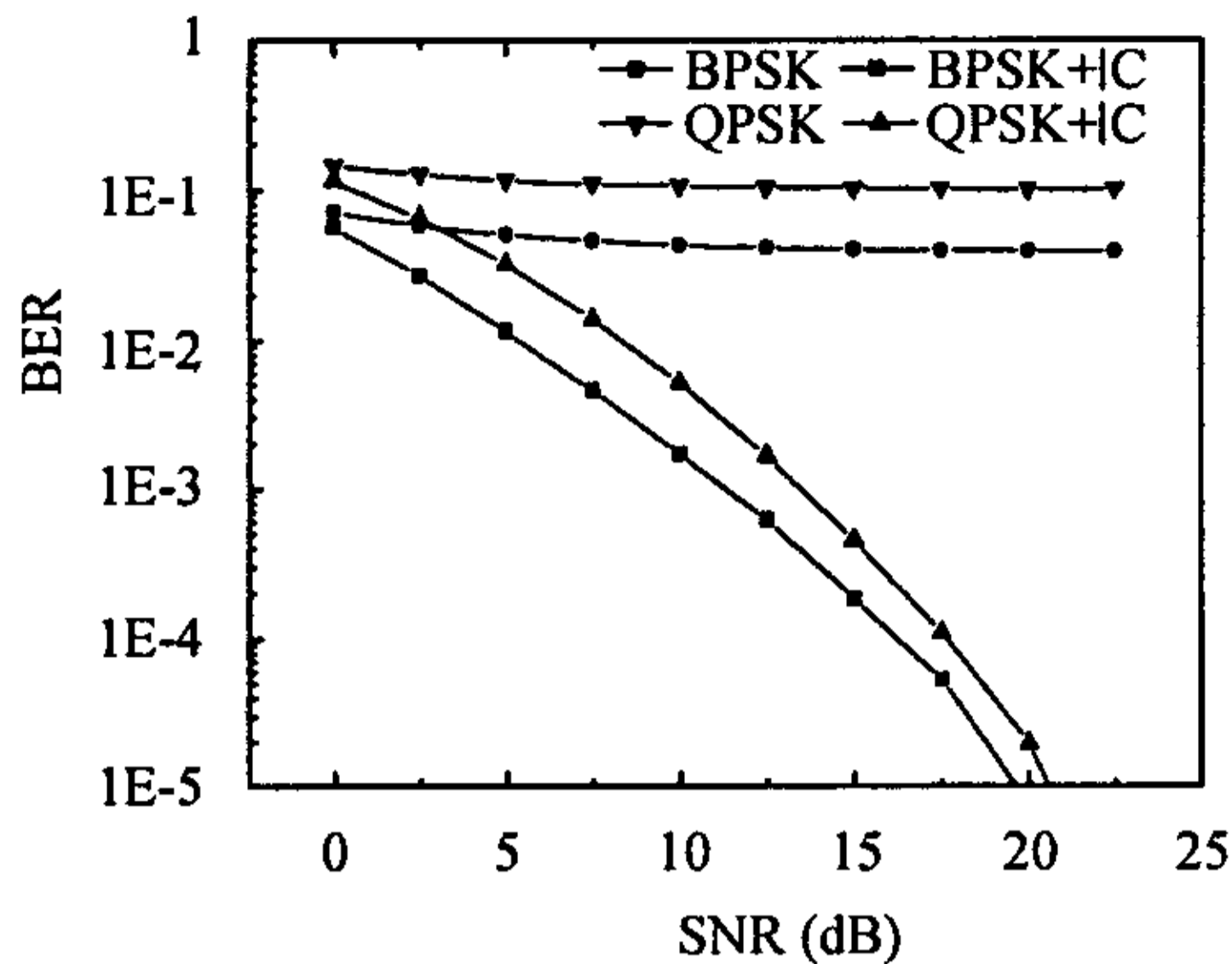


图5 共道干扰下干扰抵消处理的结果

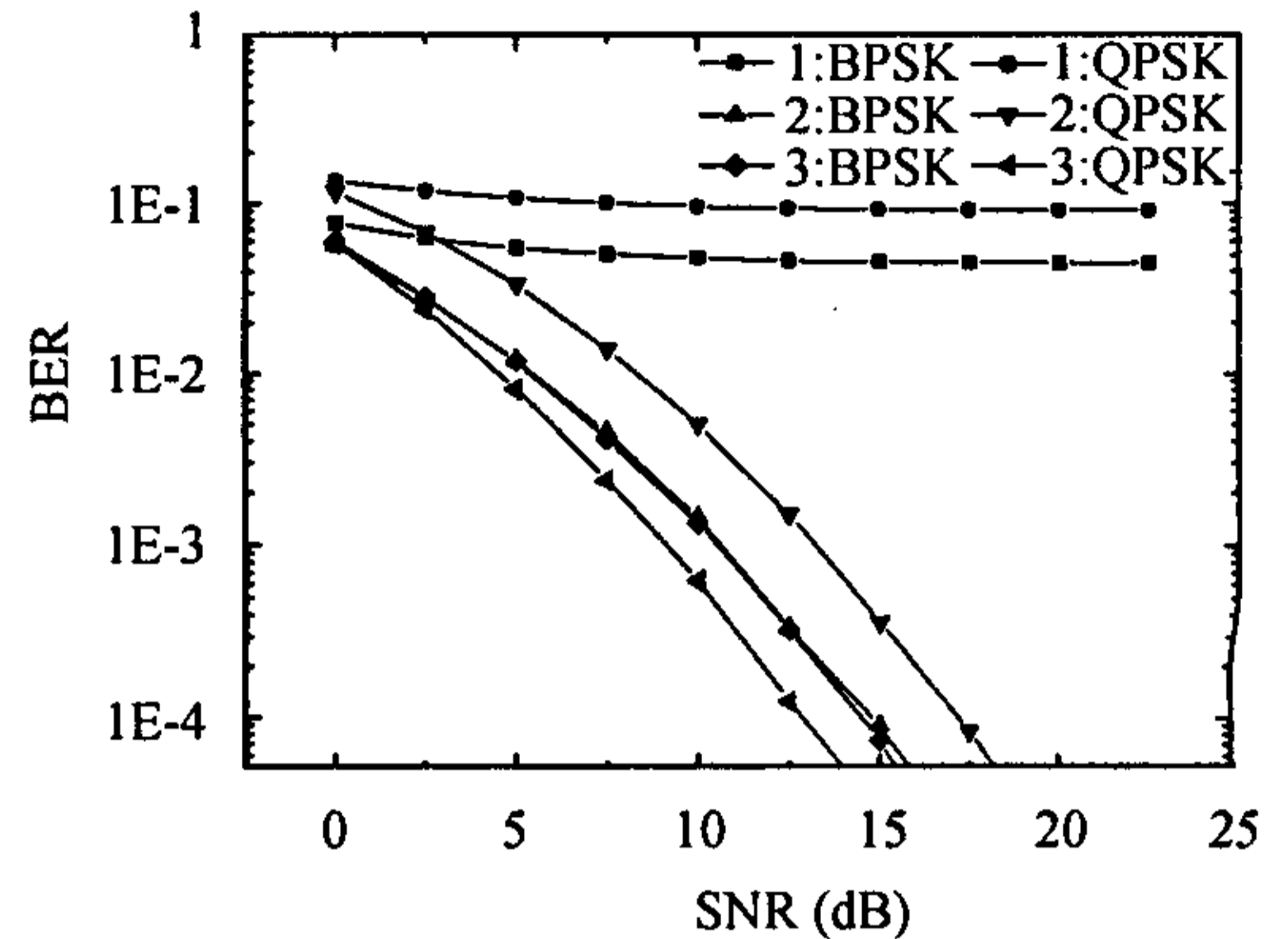


图6 采用分步解码干扰抵消策略的结果

6 结论

本文在对空时分组编码简要介绍的基础上, 针对共道用户的抗干扰技术加以研究, 提出了一种利用抗干扰技术提高通信系统容量的实现方式。文中在利用共道信号之间的相干性进行干扰抵消的基础上, 结合不同调制方式在抗干扰性能方面的不同, 提出多个用户进行分步解码的策略。这样不仅保留了干扰抵消算法的优点, 又弥补了多个用户之间彼此独立解码的不足。这种采用共道用户加分步解码的策略较大提高了系统的容量, 同时也能够对扩容系统的通信质量提供保证。

参 考 文 献

- [1] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE J. on Select Areas in Communications*, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [2] Vahid Tarokh, Ayman Naguib, Nambi Seshadri, Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criteria in the presence of channel estimation errors, mobility, and multiple paths. *IEEE Trans. on Communications*, 1999, 47(2): 199-207.
- [3] Vahid Tarokh, Nambi Seshadri, Calderbank A. R. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1998, 44(2): 744-765
- [4] 邱玲, 朱近康, 孙葆根, 张磊. 第三代移动通信技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001: 151-158.
- [5] Cristian Budianu, Lang Tong. Channel estimation for space-time orthogonal block code. 2001 IEEE International Conference on Communications, 2001, 6.11-14: Vol4: 1127-1131.
- [6] Naguib A F, Seshadri N, Calderbank A R. Space-time coding and signal processing for high data rate wireless communications. *IEEE Signal Processing Mag.*, 2000, 17(3): 76-92.
- [7] 郭梯云, 杨家玮, 李建东. 数字移动通信 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996: 290-369.

刘 勤: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向: 移动通信、个人通信。

杨家玮: 男, 1946 年生, 教授, 博士生导师, 中国通信学会高级会员, 中国电子学会高级会员, 陕西电子学会通信专业委员会主任委员。研究方向: 移动通信、无线通信、数据通信。

李建东: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 通信工程学院院长, 中国通信学会会士, 中国电子学会高级会员, IEEE 高级会员, 第一届和第四届 863 个人通信技术专业专家组成员, 总装备部和电子科学研究院通信与导航专家组成员。研究方向: 个人通信、移动通信、分组无线网、自组织网络、软件无线电、宽带无线 IP 技术、战术互联网等。