

基于认知协同的时频序列设计

姜显扬^① 张超^② 陆建华^{①②}

^①(清华大学电子工程系 北京 100084)

^②(清华大学航天航空学院 北京 100084)

摘要: 为了提高认知的跳频 CDMA 通信系统的抗干扰性能和系统容量, 论文提出了一种基于认知协同的可重新配置的三无碰撞区时频序列的构造方法, 并进一步证明了构造方法的有效性, 列举了构造示例和汉明相关函数的性能。这种可重新配置的时频序列构造方法可以应用到认知的、可重构通信系统中。

关键词: 认知无线电; 时频序列; 协同通信; 三无碰撞区

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1903-05

Time-Frequency Sequence Design Based on Cognitive Collaboration

Jiang Xian-yang^① Zhang Chao^② Lu Jian-hua^{①②}

^①(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^②(School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to improve the anti-interference performance and system capacity of cognitive Frequency Hopping Code Division Multiple Access (FH-CDMA) communication systems, a kind of time-frequency sequence with three no hit zone, which can be made reconfiguration based on cognitive collaboration, is presented by this paper. The sequence design method is proved effectively. A construction example is enumerated, as well as the performance of its Hamming correlation function is explained. This kind of construction method of time-frequency sequences can be made reconfiguration and applied highly in cognitive reconfigurable communication systems.

Key words: Cognitive Radio (CR); Time-frequency sequence; Collaboration communication; Three No Hit Zone (T-NHZ)

1 引言

随着宽带无线通信技术的飞速发展, 无线用户的数量急剧增加, 使得频谱资源变得越来越紧张。同时, 频谱的授权和利用又极不平衡, 有的频带大部分时间没有用户使用处于空闲状态, 有的频带的使用则竞争非常激烈^[1]。为此, 人们提出了认知无线电(Cognitive Radio, CR)的概念^[2-4]。认知无线电是一种智能的无线通信技术, 通过感知周围环境的“频谱空洞”, 自适应、智能、动态地选择和利用这些空闲频谱, 从而提高频谱利用率, 解决频谱资源匮乏的问题。

基于认知的跳频 CDMA 通信系统^[5]利用了无碰撞区(No Hit Zone, NHZ)跳频序列, 当从跳频序列中消除某些频点时, 序列仍然具有无碰撞区, 解决了抗多径干扰和多址干扰的问题。但是, 仍然存在一些问题尚未解决, 比如其跳频序列去掉几个频点之后的序列长度参差不齐, 而且跳频序列的数目也

不多, 不利于系统容量的提升。

在时频混合扩频通信系统中, 利用“三无碰撞区时频序列”^[6]不仅可以较大地提高序列集中的序列数目, 而且由于其奇相关函数也具有零相关区, 可以进一步提高抗多址干扰和多径干扰的能力。本文将认知无线电的理念引入时频混合扩频 CDMA (TFH-CDMA)通信系统中, 通过协同利用时域和频域的资源, 结合直接序列扩频和跳频扩频的优点, 设计优化的基于认知的时频混合扩频序列, 从而提高通信系统的频谱利用率和自适应能力。基于认知的 TFH-CDMA 通信系统具有一定的可重构性能^[7], 在未来的下一代通信系统中具有应用潜力。

文章的安排如下: 第 2 节给出了基于认知的 TFH-CDMA 通信系统模型; 第 3 节给出了认知协同的三无碰撞区时频序列设计方法; 第 4 节给出了上述序列设计方法的有效性证明, 并分析了其性能。

2 认知的 TFH-CDMA 通信系统

直扩和跳频系统是用得最多的两种扩频技术, 具有很强的抗干扰能力。这两种方式都有自己的独

到之处,但也存在各自的不足,将两者有机地结合起来,可以大大改善系统性能,提高抗干扰能力。把直接序列扩展频谱和跳频结合起来,使较宽的直接序列扩频信号在更宽的频带范围内按照一定的跳频规律跳变,在一段时间内均匀使用这一更宽频带的通信系统,叫跳频/直扩混合的 CDMA(TFH-CDMA)通信系统,可以简称为时频混合扩频通信系统。

传统的时频混合扩频系统用一个伪随机序列同时进行直接序列扩频和控制产生跳频图案,本文应用的时频混合扩频系统与此不同的是,采用两个不同的序列,一个用来进行直接序列扩频,另外一个用来产生跳频图案,如图 1 所示。这样做是为了协同分配时域和频域的资源,协同处理直扩序列和跳频序列的组合优化,协同调节直扩序列和跳频序列的自相关函数和互相关函数之间的矛盾,解决优化序列集当中序列数目不足和抗干扰优化的问题。

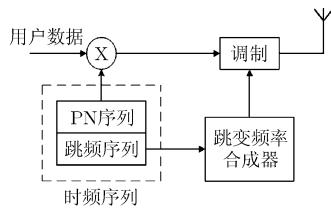


图 1 时频序列分立的混合扩频通信系统

从图 1 中可以看出,时频序列包括直扩序列和跳频序列,两者是分立的,分别控制直扩调制和跳变频率合成器。设跳频序列为 $A = (a_0, a_1, \dots, a_i, \dots, a_N)$, 直扩序列为 $B = (b_0, b_1, \dots, b_i, \dots, b_M)$, 为了方便起见,数学上可以将时频序列表示成序列对的形式,记为 (A, B) 。

三无碰撞区时频序列应用于时频混合扩频通信系统中,可以提高抗干扰能力,提高频谱利用率,从而提高系统容量。如果时频混合通信系统具备认知功能,在与授权无线网络共存的环境中,认知的 TFH-CDMA 通信系统既要能感知环境中频谱的利用情况,又要能自适应地改变跳频频率以避免与授权用户发生冲撞。这一问题可以转化为设计协同的时频序列,当从序列中消除某几个跳频频点的时候,时频序列仍然具有 3 个无碰撞区。

文献[5]说明了正交跳频序列在去掉一个跳频频点以后,其正交性就被破坏了,频点碰撞就会发生;而 NHZ 跳频序列在去掉一个或几个频点以后,只要去掉的频点数小于无碰撞区,则仍然具有无碰撞区的特性。

以周期为 32 的跳频序列 $N(L, M, N_{HZ}) = N(32, 4, 3)$ 为例,其中 L 表示序列长度, M 表示序列数目, N_{HZ} 表示无碰撞区长度,序列集如式(1)所示。

$$\begin{aligned}
 N(1) &= \{28, 30, 29, 31, 24, 30, 17, 31, 1, 28, 2, 31, \\
 &\quad 1, 24, 6, 23, 11, 9, 21, 23, 15, 9, 25, 23, 22, \\
 &\quad 11, 10, 23, 22, 15, 14, 31\} \\
 N(2) &= \{7, 5, 14, 12, 28, 26, 29, 19, 26, 7, 17, 12, 5, \\
 &\quad 28, 10, 27, 16, 18, 6, 4, 11, 13, 21, 27, 13, 16, \\
 &\quad 25, 4, 18, 11, 2, 19\} \\
 N(3) &= \{11, 9, 21, 23, 15, 9, 25, 23, 22, 11, 10, 23, 22, \\
 &\quad 15, 14, 31, 28, 30, 29, 31, 24, 30, 17, 31, 1, 28, \\
 &\quad 2, 31, 1, 24, 6, 23\} \\
 N(4) &= \{16, 18, 6, 4, 11, 13, 21, 27, 13, 16, 25, 4, 18, \\
 &\quad 11, 2, 19, 7, 5, 14, 12, 28, 26, 29, 19, 26, 7, 17, \\
 &\quad 12, 5, 28, 10, 27\}
 \end{aligned} \tag{1}$$

比如,去掉频点“6”以后,跳频序列变成 $N(31, 4, 2)$, 即周期为 31, 无碰撞区大小为 2。 $N(32, 4, 3)$ 中序列 $N(1)$ 的自相关函数和 $N(1)$ 与 $N(2)$ 的互相关函数如图 2 所示;去掉频点“6”之后的 $N(31, 4, 2)$ 中序列 $N(1)$ 的自相关函数和 $N(1)$ 与 $N(2)$ 的互相关函数如图 3 所示。

对于重复序列,有可能同一个频点同时对应着序列中的几个元素,去掉以后序列长度变得参差不

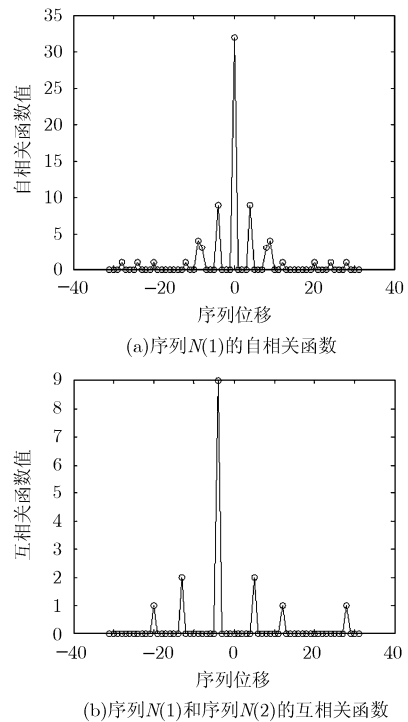


图 2 $N(32, 4, 3)$ 中序列 $N(1)$ 的自相关函数和序列 $N(1)$ 与 $N(2)$ 的互相关函数

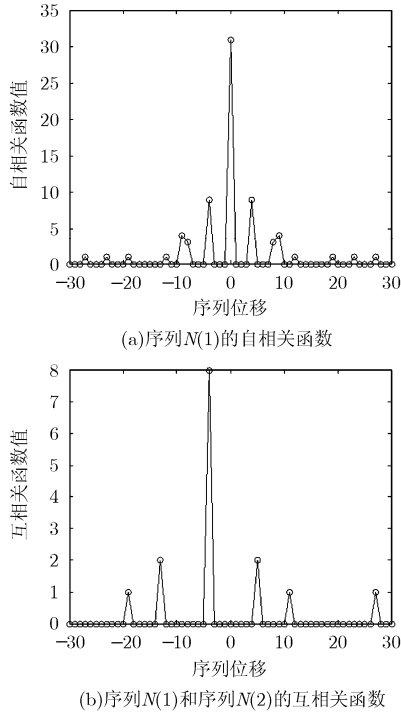


图 3 $N(31,4,2)$ 中序列 $N(1)$ 的自相关函数和序列 $N(1)$ 与 $N(2)$ 的互相关函数

齐, 破坏了相关特性。而且, 由于 T-NHZ 时频序列是从 NHZ 跳频序列和 Hadamard 矩阵构造而来, 虽然跳频序列去掉几个频点以后仍然具有无碰撞区, 但三无碰撞区的特性却被破坏了。因此针对时频混合扩频通信系统, 需要设计更加优化的时频序列。

3 认知协同的时频序列设计

本节提出一种认知协同的三无碰撞区时频序列的构造方法。具体构造方法如下所述。

步骤 1 构造 NHZ 跳频序列集, 并随机分成序列数目相等的两组。

NHZ 跳频序列的构造方法在文献[8]中有详细介绍, 在此不再赘述。

序列集分组是随机的, 比如式(1)中, $N(1)$ 和 $N(2)$ 为第 1 组, $N(3)$ 和 $N(4)$ 为第 2 组。两组序列之间随机地建立一一对应的关系, 比如 $N(1)$ 和 $N(3)$ 对应, $N(2)$ 和 $N(4)$ 对应。

步骤 2 构造 Hadamard 矩阵, 并用第 1 组的 NHZ 跳频序列和 Hadamard 矩阵做直积, 构造三无碰撞区时频序列。三无碰撞区时频序列的构造方法如文献[6]所述。

步骤 3 在认知环境中, 当需要在跳频频率中去掉某个频点时, 重新构造无碰撞区时频序列。

从第 1 组 NHZ 跳频序列中去掉某个或某几个特定的频点, 这时序列长度变短, 假如变短了 L 长。

然后从第 2 组 NHZ 跳频序列中, 选取对应的序列, 设无碰撞区的长度为 Z , 在对应序列的头部和尾部分别截取 Z 长的序列, 去掉其中特定的频点并组合在一起, 然后再截取 L 长的序列, 并补齐到第 1 组对应序列的最后, 使第 1 组序列恢复到原来的长度。

步骤 4 构造新的三无碰撞区时频序列。

补齐后的 NHZ 序列和原来的 Hadamard 矩阵重新做直积, 可以构造新的三无碰撞区时频序列。

举例具体说明上述构造方法。

例 1 如式(1)的 NHZ 跳频序列, 将 $N(1)$ 和 $N(2)$ 分为第 1 组, $N(3)$ 和 $N(4)$ 分为第 2 组, $N(1)$ 和 $N(3)$ 对应, $N(2)$ 和 $N(4)$ 对应。构造 32×32 维的 Hadamard 矩阵, 与第 1 组 NHZ 序列做直积, 得到三无碰撞区时频序列。由于序列数目比较多, 这里只列举其中的几项:

$$\begin{aligned}
 T(1) &= \{28, -30, 29, -31, 24, -30, 17, -31, 1, \\
 &\quad -28, 2, -31, 1, -24, 6, -23, 11, -9, 21, \\
 &\quad -23, 15, -9, 25, -23, 22, -11, 10, -23, \\
 &\quad 22, -15, 14, -31\} \\
 T(2) &= \{28, 30, -29, -31, 24, 30, -17, -31, 1, \\
 &\quad 28, -2, -31, 1, 24, -6, -23, 11, 9, -21, \\
 &\quad -23, 15, 9, -25, -23, 22, 11, -10, -23, \\
 &\quad 22, 15, -14, -31\} \\
 T(3) &= \{7, -5, 14, -12, 28, -26, 29, -19, 26, -7, \\
 &\quad 17, -12, 5, -28, 10, -27, 16, -18, 6, -4, \\
 &\quad 11, -13, 21, -27, 13, -16, 25, -4, 18, \\
 &\quad -11, 2, -19\} \\
 T(4) &= \{7, 5, -14, -12, 28, 26, -29, -19, 26, 7, \\
 &\quad -17, -12, 5, 28, -10, -27, 16, 18, -6, \\
 &\quad -4, 11, 13, -21, -27, 13, 16, -25, -4, 18, \\
 &\quad 11, -2, -19\}
 \end{aligned} \tag{2}$$

在认知环境中, 当需要去掉频点“6”时, 截取 $N(3)$ 和 $N(4)$ 的最后一位, 补齐到 $N(1)$ 和 $N(2)$ 中, 得到式(3)的 NHZ 序列 $\tilde{N}(32, 4, 2)$ 为

$$\begin{aligned}
 \tilde{N}(1) &= \{28, 30, 29, 31, 24, 30, 17, 31, 1, 28, 2, 31, \\
 &\quad 1, 24, 23, 11, 9, 21, 23, 15, 9, 25, 23, 22, 11, \\
 &\quad 10, 23, 22, 15, 14, 31, 23\} \\
 \tilde{N}(2) &= \{7, 5, 14, 12, 28, 26, 29, 19, 26, 7, 17, 12, 5, \\
 &\quad 28, 10, 27, 16, 18, 4, 11, 13, 21, 27, 13, 16, \\
 &\quad 25, 4, 18, 11, 2, 19, 27\}
 \end{aligned} \tag{3}$$

$\tilde{N}(1)$ 的自相关函数和 $\tilde{N}(1)$ 与 $\tilde{N}(2)$ 的互相关函数如图 4 所示。

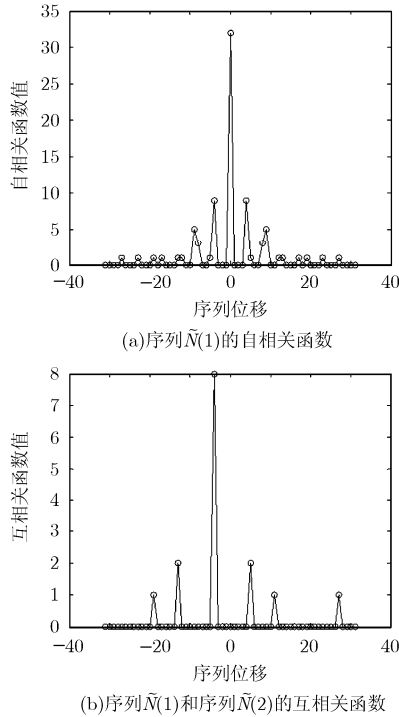


图4 $\tilde{N}(32, 4, 2)$ 中序列 $\tilde{N}(1)$ 的自相关函数和序列 $\tilde{N}(1)$ 与 $\tilde{N}(2)$ 的互相关函数

然后，把式(3)的 NHZ 跳频序列与原来的 Hadamard 矩阵重新做直积，得到新的三无碰撞区时频序列，如式(4)所示。

$$\begin{aligned}
 \tilde{T}(1) &= \{28, -30, 29, -31, 24, -30, 17, -31, 1, \\
 &\quad -28, 2, -31, 1, -24, 23, -11, 9, -21, 23, \\
 &\quad -15, 9, -25, 23, -22, 11, -10, 23, -22, \\
 &\quad 15, -14, 31, -23\} \\
 \tilde{T}(2) &= \{28, 30, -29, -31, 24, 30, -17, -31, 1, \\
 &\quad 28, -2, -31, 1, 24, -23, -11, 9, 21, -23, \\
 &\quad -15, 9, 25, -23, -22, 11, 10, -23, -22, \\
 &\quad 15, 14, -31, -23\} \\
 \tilde{T}(3) &= \{7, -5, 14, -12, 28, -26, 29, -19, 26, -7, \\
 &\quad 17, -12, 5, -28, 10, -27, 16, -18, 4, -11, \\
 &\quad 13, -21, 27, -13, 16, -25, 4, -18, 11, -2, \\
 &\quad 19, -27\} \\
 \tilde{T}(4) &= \{7, 5, -14, -12, 28, 26, -29, -19, 26, 7, \\
 &\quad -17, -12, 5, 28, -10, -27, 16, 18, -4, \\
 &\quad -11, 13, 21, -27, -13, 16, 25, -4, -18, \\
 &\quad 11, 2, -19, -27\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

4 性能分析

以上重新构造的时频序列具有 3 个无碰撞区，可以证明如下。

证明 上文已经说明，当从 NHZ 跳频序列中去掉某个或某几个频点时，只要去掉的频点数小于无碰撞区的大小，则去掉频点后的跳频序列仍然是 NHZ 序列。如图 5 所示，不失一般性，从 NHZ 序列集中任意选择 4 个序列，设 f_1, f_2, f_3, f_4 为去掉频点后的 NHZ 跳频序列，其长度不等， f_1, f_2 为第 1 组， f_3, f_4 为第 2 组， $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4$ 分别为序列的头部和尾部，长度小于等于 NHZ 的大小。不失一般性，设 NHZ 长度为 Z ，去掉的频点个数为 d ，则头部和尾部为原序列头部和尾部分别截取长度 Z 的序列后再去掉指定的频点后剩余的部分，长度取值最小为 $(Z-d)$ 。根据 NHZ 序列的性质，可知这些头部和尾部之间没有重复的频点，否则当汉明相关函数的相移小于 Z 时取值可能不为零，与 NHZ 序列的定义矛盾。由于序列 f_1, f_2, f_3, f_4 去掉的频点数可能不等，头部和尾部 $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4$ 的长度也不尽相等。“ $(A_3 + B_3)^*$ ”为组合头部 A_3 和尾部 B_3 在一起，并截取 $(A_3 + B_3)$ 的后半部分，使截取到的短序列长度等于 f_1 去掉的频点数，“ $(A_4 + B_4)^*$ ”的截取方法与此相同，即跳频序列“ f_1^* ”和“ f_2^* ”的长度恢复到去掉频点以前的序列长度。由于 f_1, f_2 本身即为 NHZ 序列，“ $(A_3 + B_3)^*$ ”、“ $(A_4 + B_4)^*$ ”与 A_1, A_2, B_1, B_2 之间没有重复频点，所以“ f_1^* ”和“ f_2^* ”也是 NHZ 序列。证毕

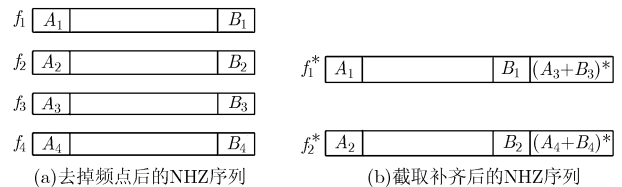


图5 NHZ 跳频序列截取补齐示意图

从上述证明过程可知，这一构造方法需要两个前提条件：

(1) 去掉的频点数 d 小于 NHZ 的长度 Z ，即 $Z-d > 0$ ；

(2) 设原 NHZ 序列中无碰撞区长度为 Z ，第 1 组某序列去掉的频点数为 $d1$ ，第 2 组对应的序列的头部和尾部去掉的频点数共为 $d2$ ，则应有 $2Z-d2 > d1$ 。如果满足条件(1)，由于 $d1 < Z$ ， $d2 < Z$ ，则有 $2Z-d2 > d1$ 始终成立。即只需满足条件(1)，构造方法就有效。

设 d_i 为序列中去掉的频点数， $D = \max\{d_i\}$ ，原 NHZ 序列中无碰撞区长度为 Z ，则截取补齐得到的 NHZ 序列的无碰撞区长度最小为 $(Z-D)$ ，最后构造得到的 T-NHZ 序列的三无碰撞区长度最小也是

($Z-D$), 序列数目为原 T-NHZ 序列数目的一半。虽然这样构造导致序列数目减半, 但由于原 T-NHZ 序列的数目是原 NHZ 序列的 L 倍, 减半后仍然是原 NHZ 序列的 $L/2$ 倍, L 为 Hadamard 矩阵的维数, 数目仍然相当多。

5 结束语

认知无线电可以感知和利用无线环境中的频谱空洞, 将其应用于时频混合扩频 CDMA 系统中, 可以提高空闲的频谱资源利用率。在时频混合扩频通信系统中, 通过认知功能自适应地调节跳频频点, 协同利用时域和频域的资源, 结合直接序列扩频和跳频扩频的优点, 设计优化的基于认知协同的时频扩频序列, 从而提高通信系统的频谱利用率和自适应能力。

本文提出了一种基于认知协同的时频序列构造方法, 当从原序列中去掉某个或几个频点以后, 只要去掉的频点数目不大于无碰撞区的长度 Z , 则重新构造的时频序列仍然具有 3 个无碰撞区, 从而维持其抗多径干扰和多址干扰的性能。这一可重新配置的特性在具有认知功能的可重构通信系统中, 具有可观的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Kolodzy P. Spectrum policy task force: finding and recommendations. International Symposium on Advanced Radio Technologies (ISART), Colorado, USA, March, 2003: 1-6.
- [2] Mitola J, Gerald Q, and Maguire J. Cognitive radios: Making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13-18.
- [3] Mitola J. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio. [Ph.D. dissertation], Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [4] Prasad R V, Pawelczak P, Hoffmeyer J A, and Berger H S. Cognitive functionality in next generation wireless networks: standardization efforts. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(4): 72-78.
- [5] He S, Xuan G, and Wu L. Sequence design for cognitive FH-CDMA systems. 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA'2007), Harbin, 2007: 1543-1546.
- [6] Jiang X Y, Zhang C, and Lu J H. Sequences with three no hit zones and their applications in time-frequency hopping systems. First International Conference on Communications and Networking in China (Chinacom'2006), Beijing, 2006, Vol.1: 1-5.
- [7] Xu F, Zhang L, Zhou Z, and Ye Y. Architecture for next-generation reconfigurable wireless networks using cognitive radio. 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Singapore, 2008, Vol.1: 1-5.
- [8] Wang X and Fan P. A class of frequency hopping sequences with no hit zone. Proc. PDCAT 2003, Chengdu, 2003, Vol.1: 896-898.

姜显扬: 男, 1971 年生, 博士生, 研究方向为宽带无线通信、序列设计等。
 张超: 男, 1978 年生, 副教授, 研究方向为序列设计、深空通信等。
 陆建华: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带无线通信、多媒体信号处理等。