

# 差分型码分多址通信系统及相关技术

殷奎喜<sup>1</sup>, 柯炜<sup>1</sup>, 赵华<sup>1</sup>, 宋文娟<sup>1</sup>, 刘国锦<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学物理科学与技术学院, 210097, 南京; 2. 南京师范大学分析测试中心, 210097, 南京)

[摘要] 提出了一种带有瞬时位相调制技术的高性能差分型码分多址系统. 该系统中的瞬时位相调制技术是当前最新通信技术之一, 描述了  $1/4$ -DQPSK 瞬时位相调制的基本原理并画出了瞬时位相解调级框图. 系统中应用了连续位相的 Walsh 码作为扩谱码, Walsh 码的产生方法有较大创新. 这两项最新技术的应用, 提高了系统性能, 有效地克服了多路瑞利衰减.

[关键词] 瞬时位相, 扩谱, Walsh 码发生器, 希尔伯特变换

[中图分类号] TN914.53; [文献标识码] B; [文章编号] 1672-1292(2002)01-0032-06

## 0 引言

在数字移动通信领域中, 人们追求的目标是频率利用效率高、抗干扰能力强的通信系统. 码分多址(简称 CDMA)技术应用于数字移动通信领域所构成的通信系统, 是一种富有生命力和应用前景的卓越的移动通信系统. 如美国 Qualcomm 公司公布的 W-CDMA 系统(又叫广带域码分多址系统), 就是一种在 1998 年欧洲 ETSI 的 SMG2 会议上各国代表投票认可的系统, 也被称为第 3 代移动通信系统, 该系统符合国际电气联合会(ITU)所提出的 IMT-2000 劝告标准.

参照美国的 W-CDMA 系统, 本文介绍一种瞬时位相的差分型码分多址扩谱通讯系统(又叫 differential coding CDMA 简称 diffCDMA system), 其具有 2 Mbps 的数据传送能力和 32 个业务信道, 每一信道数据传送能力为 64Kbps. 系统使用了扩谱通信(又叫扩频通信)技术.

与其他宽带域 CDMA 系统相比, 特别之处有 3 点: (1) 信号调制级采用瞬时位相的  $1/4$ -DQPSK 调制器, 将双位信号(dibit) 00, 01, 10, 11 等信号变成相应的位相差, 进行调制, 这也叫做基本调制级或第一级调制级, 调制频率为 32 kHz. (2) 用正交 Walsh 码作为扩展频谱的扩谱码, 关于 Walsh 码发生器, 不用常规的递归方法来产生二维  $32 \times 32$  阶的 Walsh 码, 仅用电子线路中常规的乘法器和反相器来构成. 另外, 还采用平滑化电路模块, 使用了位相连续的 Walsh 码序列作为扩谱码. 这样做能大大减少扩谱码中的高次谐波分量, 实际上也提高了信噪比. (3) diffCDMA 系统使用的是 BCH 码作为纠错编码, 而其他宽带域的 CDMA 系统使用的纠错编码是卷积编码. 图 1 是位相连续化 diff CDMA 发送端框图. 图中 BI(Binary Information resource) 模块是产生二进制信息的被传送的信号源, BE(Encode of BCH code) 是 BCH 码编码

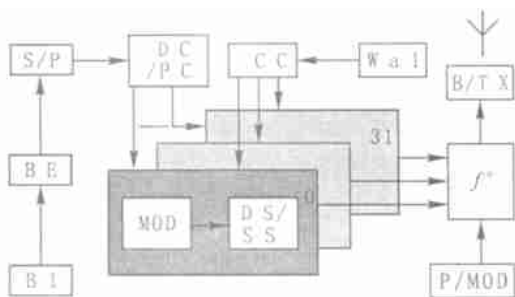


图 1 位相连续化 diff CDMA 发送端框图

模块, 其将二进制编码形式的输入信号变成 BCH 码编码形式, S/P(serial-to-parallel converter) 模块是将串联二进制信息变成并联二进制信息(Dibit). DC/PC(Differential Code/Phase Continuity) 模块是实现瞬

收稿日期: 2002-01-04

基金项目: 江苏省科委和教育厅基金资助(2001WLXS B9B411 和 2001WLXT SH BH12).

作者简介: 殷奎喜, 1949-, 南京师范大学物理科学与技术学院, 教授, 主要从事码分多址的教学与研究.

时位相差分符号化和位相连续化功能的模块. 以上 4 个模块是 32 业务信道中的 1 路模块, 图中仅画出了 1 路业务信道模块. MOD( primary Modulation) 模块是第 1 级调制模块, 将瞬时位相的  $\pi/4$  QPSK 信息进行第一次调制, DS/SS( Direct Sequence/Spread Spectrum) 模块是直接频谱扩散级模块, 这一级又可叫做第 2 级调制. 用平滑化后的 Walsh 码作为扩谱码, 对经瞬时位相  $\pi/4$  QPSK 第 1 次调制后信号再进行第 2 次调制, 也叫扩谱或扩频. 每一个码元含有 128 个切普(chip). 所有 32 路经第 2 次调制后的信号(即频谱扩散后信号), 一块送到合成模块之中去相加(求和模块), 再经过带通滤波器后, 送到发送模块(B/TX Band-pass filter/Transmission unit), 加载到 2GHz 的载波信号上, 通过天线发送出去. WAL( Walsh spread spectrum code generator) 模块是 Walsh 码发生器, 能产生 Walsh 函数中二维 32 32 阶的 Hadamark 矩阵, 该矩阵由 +1 或 -1 构成, 并且为正交矩阵. CC 模块是 Walsh 码平滑化模块. P/MOD( Pilot/Modulation) 模块是导频信号模块, 导频信号插在每一个码元(symbol)之中, 所以有 32 个业务信道可使用, 不用专门的导频信道, 这也是本系统区别与其他系统的特点之一.

图 2 为扩谱通讯中位相连续化 Diff CDMD 系统接收端框图, 信号接收端可分成若干个功能模块. 接收模块对接收到的信号进行放大处理. 同步控制模块产生同步检测、控制信号, 用来控制接收端整个电路. 信号解调级模块的主要作用是将带宽为 5 MHz 的扩谱信号从 2 GHz 的载波信号中取出, 也叫第一级解调. 解扩模块为第二级解调模块, 一端与 Walsh 码发生器连在一起, 也叫做逆扩散级, 其作用是根据不同的 Walsh 码发生器产生不同的序列, 取出每一个信道中的信息. 判决模块是将经  $\pi/4$ -DQPSK 调制器的位相差信号变成相应的二进制代码. BCH 解码器模块的主要作用是通过对 BCH 编码的解码来检测与纠正信息在传送过程中产生的随机错误.

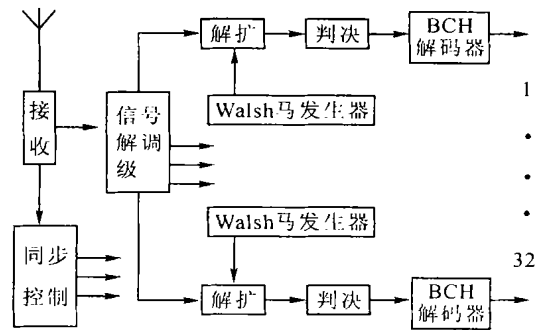


图 2 位相连续化 Diff CDMD 接收端框图

## 1 瞬时位相的 $\pi/4$ -DQPSK

图 1 中输入信号的瞬时位相是靠 DC/PC 模块来实现的. 先得到输入信号, 再找出输入信号的希尔伯特变换(Helbter Transform)的形式, 然后合成得到信号的瞬时位相. 当用 QPSK 一般位相调制方式时, 输入信号  $f(t)$  为:

$$f(t) = A \cos(\omega_c t + \phi_k) \quad kT_b \leq t < (k+1)T_b \quad (1)$$

式中:  $A$  为系数;  $\phi_k$  为第  $k$  个码元周期的位相信号;  $T_b$  为一个符号(symbol)周期或叫码元周期时间;  $\omega_c$  为载波信号的角频率.  $f(t)$  的希尔伯特变换(Helbter Transform)的形式  $f(t)^{1/2}$ , 如(2)、(3)、(4)和(5)式所示. (2)式所描述的是  $f(t)$  在频域的实函数表示形式, 可以写成奇函数与偶函数之和,  $R(\cdot)$  为偶函数,  $X(\cdot)$  作为奇函数.

$$F(\omega) = R(\omega) + jX(\omega) \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{2} \int_0^x [F(\omega) e^{j\omega t} - F(-\omega) e^{-j\omega t}] d\omega \quad (3)$$

$$\text{因为} \quad \int_0^x F(-\omega) e^{-j\omega t} d\omega = \int_x^0 F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4)$$

$$\text{所以} \quad f = \frac{1}{2j} \left[ \int_0^x F(\omega) e^{j\omega t} d\omega - \int_x^0 F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \right]$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \left[ -jF(\omega) e^{j\omega t} d + jF(\omega) e^{j\omega t} \right] d \\ &= \frac{1}{2} (j \operatorname{sgn}(\omega)) F(\omega) d \end{aligned}$$

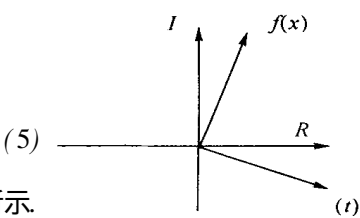


图 3  $f(t)$  与  $t$  的关系

在时域,  $f(t)$  与  $t$  的关系可以在笛卡尔直角坐标系中描述, 如图 3 所示. 二者之间的夹角为  $90^\circ$ , 即正交的关系. 从  $f(t)$  出发就可以找到  $t$ .

其次我们定义  $g(t)$ , 设:

$$g(t) = f(t) + j\dot{f}(t) \tag{6}$$

则  $A(t) = \sqrt{f^2(t) + \dot{f}^2(t)}$  (7)

$$k(t) = \tan^{-1} \frac{\dot{f}(t)}{f(t)} \tag{8}$$

$$g(t) = A(t) e^{j k(t)} \tag{9}$$

$$k(t) = k(t) - k(t - T_b)$$

$$k(t) = k(t) + k(t - T_b) \tag{10}$$

其中: (7) 式描述的是  $g(t)$  的振幅; (8) 式中  $k(t)$  是瞬时位相; (9) 式描述的是  $g(t)$  指数表达式的形式; (10) 式中描述的是相邻两个位相之间的位相差信号,  $k(t - T_b)$  是  $k(t)$  经延迟一个  $T_b$  时间周期的位相信号. 表达式 (10) 的表达式与普通的  $1/4$  DQPSK 中位相差信号表达式的形式虽然相一致<sup>[1]</sup>, 但新型瞬时位相的  $1/4$  DQPSK 位相差分信号要经过希尔伯特变换, 而普通的  $1/4$  DQPSK 中位相差信号不要经过希尔伯特变换.

最后考虑的是如何进行解调的问题. 在系统的接收端, 设  $g^*(t)$  是  $g(t)$  的共轭复数,  $g(t - T_b)$  是  $g(t)$  经延迟一个  $T_b$  时间周期的复数信号.  $g^*(t - T_b)$  是  $g(t - T_b)$  的共轭复数, 其合成信号为二者的积, 表达式如 (11) 式所示:

$$\begin{aligned} g(t) g^*(t - T_b) &= \{f(t) + j\dot{f}(t)\} \{f(t - T_b) - j\dot{f}(t - T_b)\} = \\ &= f(t) f(t - T_b) + \dot{f}(t) \dot{f}(t - T_b) + j[f(t) \dot{f}(t - T_b) - \dot{f}(t) f(t - T_b)] \end{aligned} \tag{11}$$

合成信号瞬时位相差为:

$$k(t) = \frac{\operatorname{Im}\{g(t) g^*(t - T_b)\}}{\operatorname{Re}\{g(t) g^*(t - T_b)\}} = \frac{f(t) \dot{f}(t - T_b) - \dot{f}(t) f(t - T_b)}{f(t) f(t - T_b) + \dot{f}(t) \dot{f}(t - T_b)} \tag{12}$$

根据  $1/4$  DQPSK 位相调制方式的基本原理, 输出的调制信号是由两个正交位相的信号  $I_k$  和  $Q_k$  合成而形成的. 接收端解调部分的  $I_k$  和  $Q_k$  的表达式由 (13) 式决定:

$$\begin{aligned} I_k &= \operatorname{Re}\{g(t) g(t - T_b)\} \\ Q_k &= \operatorname{Im}\{g(t) g(t - T_b)\} \end{aligned} \tag{13}$$

根据  $I_k$  和  $Q_k$  的值就可以得到位相差信号  $k(t)$ , 再经过图 2 中的判决电路, 可以将位相差信号  $k(t)$  变成相应的二进制代码, 这种解调方法为延迟解调方法. 根据公式 (11)、(12)、(13) 画出瞬时位相的  $1/4$  DQPSK 位相延迟解调框图, 见图 4 所示, H 变换器为希尔伯特变换器, 延迟器是完成一个符号周期  $T_b$  的延时.

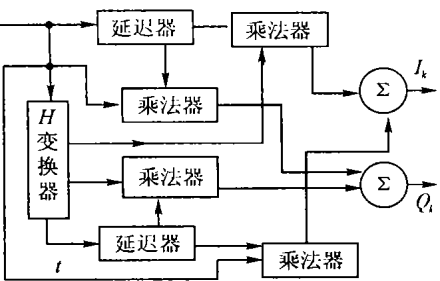


图 4 瞬时位相  $1/4$  DQPSK 位相延迟解调框图

## 2 正交 Walsh 码发生器的原理与电路图

扩谱码在扩谱通讯系统中, 用 Walsh 码作为 CDMA 的扩谱码是目前一种全新的方法. 对扩谱码而

言,容易产生并具有随机性,因此要求具有尽可能长的周期或尽可能多的排序方式,使干扰者与偷听者难以从扩谱码的一段去重建整个扩谱码,另外还要求具有良好的互相关特性和良好的自相关特性,以便于接收时的载获和跟踪,让多个用户同时、同一个频道使用.采用离散正交的 Walsh 函数产生的 Walsh 码,作为扩谱码完全符合上述要求,它可以由元素为  $\pm 1$  的矩阵完整描述.是防止破译者从信号传送过程中提取其中 熵漏 信息,特别是防止相关性 熵漏 的一种较好的方法.

产生 Walsh 码,一般用递归关系快速生成<sup>[2]</sup>.本文不用常规的递归关系快速生成方法,直接用电子线路中普通的乘法器、存储器、反相等电路构成.理论方法奇特,电路实现简明,实用性好.其理论方法见公式(14)、(15)、(16).公式(14)、(15)中的  $A$  和  $B$  均为矩阵,根据求得的 Walsh 码的大小来决定矩阵  $A$  和  $B$  中的  $N$  和  $P$  的值.公式(16)中  $H(P)$  是所要求的按 Hadamard 顺序排列的 Walsh 码,式(17)  $C$  为  $\pm 1$  或  $-1$  的码值.

$$A = [a_{ik}]_{N \times P}, (i = 1, 2, \dots, P; k = 1, 2, \dots, N; N = 2^P), a_{ik} \in \{0, 1\} \quad (14)$$

$$B = [A]^T = [b_{kj}]_{P \times N}, (k = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, P); a_{ik} \in \{0, 1\} \quad (15)$$

$$H(P) = A \cdot B = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^P a_{1k}b_{k1}, & \dots, & \sum_{k=1}^P a_{1k}b_{kN} \\ \vdots & & \vdots \\ \sum_{k=1}^P a_{Nk}b_{k1}, & \dots, & \sum_{k=1}^P a_{Nk}b_{kN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}, & C_{12}, & \dots, & C_{1N} \\ C_{21}, & C_{22}, & \dots, & C_{2N} \\ \vdots & & \vdots & \\ C_{K1}, & C_{K2}, & \dots, & C_{KN} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^P a_{ik}b_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{if } a_{ik}b_{kj} = 1 \\ -1 & \text{if } a_{ik}b_{kj} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

例如:当  $P = 2, N = 2^P = 4$  时,根据公式(14)、(15)、(16)和(17),得到矩阵  $A$ 、 $B$ :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

即得到  $2^2 \times 2^2$  阶的按 Hadamard 顺序排列的 Walsh 矩阵:

$$H(2) = \begin{bmatrix} - & - & - & - \\ - & 1 & - & 1 \\ - & - & 1 & 1 \\ - & 1 & 1 & - \end{bmatrix} \quad H(2) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & - & 1 & - \\ 1 & 1 & - & - \\ 1 & - & - & 1 \end{bmatrix}$$

其中  $-$  表示为  $-1$ ,当  $H(2)$  看成原码 Walsh 矩阵的话,  $H(2)$  可看成  $H(2)$  的补码 Walsh 矩阵,  $H(2)$  中的各元素,正好与  $H(2)$  中各元素相反,即  $+1$  变成  $-1$ ,  $-1$  变成  $+1$ .  $H(2)_0$  到  $H(2)_3$  共有 4 个序列(或矢量),每一序列(或矢量)的长度为  $N = 2^P = 4$  位.

当  $P = 5, N = 2^P = 32$  时,能得到  $2^5 \times 2^5$  阶的 Walsh 矩阵,因篇幅有限未能全部列出,而从  $H(5)_0$  到  $H(5)_{31}$  共有 32 个序列(或矢量),每一序列(或矢量)的长度为 32 位.每一个序列(或矢量)正好是 diffCDMA 系统中 32 路的一路扩谱码,二者之间有着一一对应的关系.扩谱系统具有很强的抗干扰特性,在多路瑞利衰减干扰环境下,可在输入端为  $0 \sim 30$  dB 条件下工作,之所以有这样的特性,一个重要的原因就是 diffCDMA 系统中扩谱接收机采用相关检测进行解扩.为此对式(16)所示的正交矩阵用计算机作专门的研究.其相关特性可用图 5 来描述.其中 X、Y 轴坐标表示  $H(5)$  Walsh 矩阵的行与列分量, Z 轴坐标表示相关积  $Z_i$ .从图上可以看出,互相关( $j \neq i$ )的积为 0,自相关( $j = i$ )的积为  $N = 2^P = 32$ .根据其相关特性,当不同的收信终端用不同的正交 Walsh 矩阵中的行向量去做频谱解扩时,所得到的信息为 0 (即相互相关为 0),当发送与收信端用正交 Walsh 矩阵中同一行向量去做频谱扩散与解扩时,很快

即能实现收发两端之间的通讯,而且相邻信道之间的相互干扰为 0 (自相关为 32),这对不知 Walsh 矩阵行向量或序列的第三者而言,想偷听是一种非常困难的事。

根据最新的理论方法,对公式(14)、(15)、(16)、(17),直接用电子线路中普通的计数器、乘法器、存贮器、反相器等电路,就能构成 Walsh 扩谱码发生器,见图 6 所示。其中 A 加 1 计数器,产生的数据就是按公式(14)产生的递增数据,计数器的长度为 P 位。存贮器 B 中存放的是公式(15)产生的一组数,大小为 P N 位。图中的乘法器和加法器完成的是相乘与求和运算,变换器 Tr,将输入是 0 和 1 的数变成-1 和+1 的数。Walsh 码的平滑化技术和实现见参考文献[5]。

3 实验结果

文中所描述的瞬时位相调制及解调技术,和产生 Walsh 码的理论方法,这两项技术在高性能差分型码分多址系统中已得到应用,是系统中的部分关键技术。图 1 所示整体 diffCDMA 系统模型,通过了大型计算机模拟实验。在相对静止环境下,实验中系统整体数据传送率为 2Mbit/s,模块的输入是用 32 路信息通道,每一路信息通道的数据传送速率为 64k/ bit/s,在步行环境下,系统数据传送率为 384k/ bit/s。我们用 diffCDMA 系统和 CDMA2000 系统、W-CDMA 做了对比实验,结果如图 7 所示。

图 7 中第一、二行曲线为两个 CDMA A 移动通信系统在不同信噪比下的误码率;第三行为 diffCDMA 系统采用本技术在不同信噪比下的误码率。Y 轴是系统的误码率,用对数表示;X 轴是信号和噪声的功率比,简称信噪比。从图中可以得到,在信噪比为 0dB 时,diffCDMA 系统的误码率要高出其他两个 CDMA 系统误码率的近 10 倍左右。实验结果表明,这两项技术是最新技术,提高了系统性能,有效地克服了多路瑞利衰减。

[参考文献]

[1] Ohba M, Yin Kuixi, Masahichi Kishi. 1.6 Mbit/sec High Capacity Land Mobile Transmission Characteristics of Differential Coding CDMA over Multi Ray Rayleigh Fading Channel[J]. IEEE VTC 99, Proc, 1999: 2333~ 2337.

[2] 杨义先,林须端. 编码密码学[M]. 北京:人民邮电出版社,1992,21.

[3] Kishi M, Zhang X, Yin K. The High Capacity and High Speed diffCDMA with the BCH Double Error Correction and Continuous Phase Primary Modulation[J]. PIMRC 99, Osaka, Japan, 1999: 1556~ 1560.

[4] Yin K, Kishi M. The high capacity and high speed diffCDMA with the BCH double error correction and continuous phase Primary modulation. PIMRC 99, Osaka, Japan, 1999: 1550~ 1555.

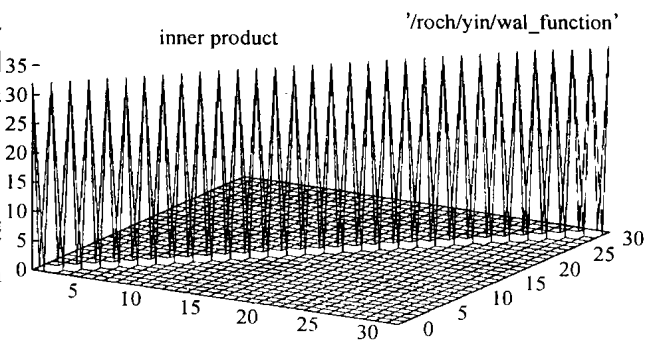


图 5 Walsh 函数的相关特性

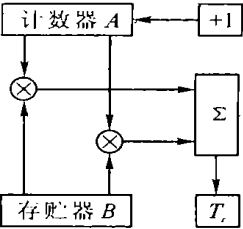


图 6 Walsh 码框图

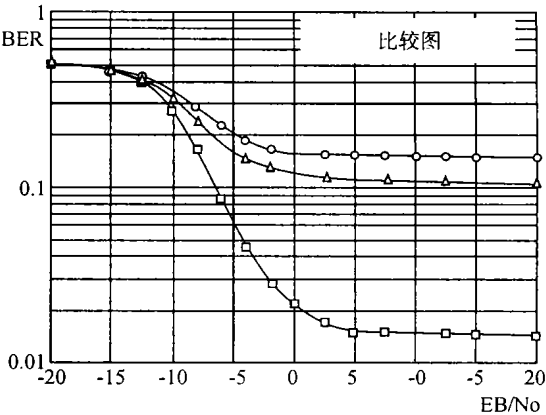


图 7 三个系统的比较

## The Communication system of differential Code Division Multiple Access and Key technology

Yin Kuixi<sup>1</sup>, Ke Wei<sup>1</sup>, Zhao Hua<sup>1</sup>, Song Wenjuan<sup>1</sup>, Liu Guojin<sup>2</sup>

(1. College of Physics Science, Nanjing Normal University, 210097, Nanjing, RPC;

2. Analysis and Test Centre, Nanjing Normal University, 210097, Nanjing, PRC)

**Abstract:** The high quality differential coding CDMA ( diffCDMA ) system with instantaneous phase that is new technology in communication field has been devised. The principle of modulation with  $\pi/4$ -DQPSK instantaneous phase and the illustration of demodulation has been devised. The new Walsh code taken as spread-spectrum code has been adopted. The application of the two items of important technology to the differential coding CDMA ( diffCDMA ) system improves the capacity and eliminates the fatal transmission error when communications are carried out from high speed running mobiles through such urban environment as rapid multi-ray Rayleigh channel. This two items of technology involve not only mathematical problems of communication theory but also electronic circuit problems in diffCDMA system.

**Key words:** instantaneous phase, spread spectrum, generator of w alsh code, hilbert transformation

[ 责任编辑: 黎]

---

( 上接第 31 页)

## Multicenter Thermometer with Numeral Display

Shen Shibin

( Department of Control Science and Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

**Abstract:** Utilizing the characteristic of PIC16C71 SCM, a small thermometer to be used in medicine or family has been designed. It is small in the volume of circuit, little power-wasting and of comprehensive function. It avoids the disadvantage of fragility and indirect reading of traditional mercury thermometer, and can be widely used in many fields.

**Key words:** PIC16C71, thermometer, LM35

[ 责任编辑: 刘健]