

新型的 CD-DCSK 混沌键控保密通信系统

朱勇¹, 王佳楠^{1,2}, 丁群¹

(1. 黑龙江大学 黑龙江省高校电子工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国电信股份有限公司 黑龙江分公司, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对现有混沌键控通信系统存在的数据传输速率低性、安全性差等问题, 提出一种新型的混沌键控通信系统——CD-DCSK (相关延迟—差分混沌键控), 并对该系统的通信性能进行了深入地仿真分析。验证了改进的 CD-DCSK 同时兼具 CDSK (相关延迟键控) 保密性高和 DCSK 误码率低的优点, 并且系统的数据传输速率更是提高到了原有键控方式的 2 倍。同时利用该新型的键控系统很好地实现了图像数据信号的保密传输, 证明本系统在数字保密通信中的可实现性和高安全性。

关键词: 混沌数字通信; 混沌键控; CD-DCSK; 图像加密

中图分类号: TN918

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)05-0169-08

New kind of CD-DCSK chaos shift keying secure communication system

ZHU Yong¹, WANG Jia-nan^{1,2}, DING Qun¹

(1. Heilongjiang Province Key Lab. of Senior-Education for Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;

2. China Telecom Corporation Limited Heilongjiang Branch, Harbin 150001, China)

Abstract: As existing chaos keying communication systems had the issues of low data transmission rate and weak system confidentiality, a new kind of chaos shift keying communication system: CD-DCSK (correlation delay-differential chaos shift keying) was presented. At the same time lucubrated and simulated the communication performances of this new system. The theoretical deduction and emulational experimentation analysis verified that CD-DCSK has both merits of high confidentiality of CDSK and low BER of DCSK, and its transmission rate is twice as much as original shift keying schemes. Meanwhile, this new communication scheme perfectly achieved the secrecy transmission of image signal. Therefore, it can be clearly seen that this new system is realizable and has high security.

Key words: chaos digital communication; chaos shift keying; CD-DCSK; image encryption

1 引言

目前, 在国际通信系统的研究中, 通常将混沌通信划分为 4 种基本类型: 混沌遮掩、混沌键控、混沌参数调制和混沌扩频。这 4 种通信方式都各自存在相应的缺陷, 应用于实际保密通信比较困难, 如何提出一种通信性能更好、更利于实际应用传输的通信方案已成为科研工作者的研究热点。混沌遮

掩保密通信系统发送调制端的信号, 附着在混沌载波上的方式可以有相加、相乘和加乘 3 种方法^[1]。该通信系统电路结构比较简单, 但在接收端要求重构发送端混沌信号, 而且收发双方系统实现正常通信的前提是基于严格同步, 在硬件电路中较难实现^[2,3]。混沌参数调制保密通信实现的关键在于参变量的恢复程度, 而且其通信解调方式一般采用函数求逆法, 具有较低的抗干扰性, 也因此降低了通信的效

收稿日期: 2010-09-06; 修回日期: 2011-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60672011, 61072072)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (60672011, 61072072)

率。同时随着参与调制通信的参变量增多，每个参变量间会相互影响，因此增加了误码率^[4,5]。目前，基于传统同步调制方式的混沌收发系统的通信性能并不能很好地适用信道中的中、低信噪比情况，同步性能严重制约着混沌保密通信的实际传输，因此，基于非相干解调的混沌键控通信系统是最具有发展前景的混沌通信方式^[6,7]。混沌键控的研究更加偏重于实际通信信道中性能的研究，如保密性能、传输速率、误码率性能、抗多路传播、频带和功率的利用率问题、多用户能力，而在这些方面，混沌键控保密通信系统在通信信道中的性能更具优势。

在目前的混沌键控通信系统中，基于非相干解调的 DCSK 具有最好的通信顽健性和误码率性能^[8]，但是 DCSK 系统在实际应用中也有 2 个缺点：一个是通信传输速率较低；另一个是在一个信号传输周期内，通信信道发送的是 2 段相同或相反的参考信号和信息信号，中途被截获后通过相关分析等攻击方法很容易提取出发送信息，因此很难达到高保密性^[9~11]。CDSK 通信系统的发送端用加法器代替了开关转换结构，因此发送端能够不间断发送信息，相关延迟时间不必等于 DCSK 符号周期的时间长度，且信道信号更均匀，不再存在重复信号，但是付出了抗噪性能下降的代价^[12]。QCSK（正交混沌相移键控）系统在相同带宽的范围内，通过相互正交的混沌方程，使其数据传输速率提高到 DCSK 系统的 2 倍，但是其系统结构实现非常复杂，通信方案中的 Hilbert 变换在电路应用中是非常困难的^[13,14]。本文根据现有键控通信方式存在的缺点，提出了一种新型混沌键控保密通信方案——CD-DCSK，并对其通信性能进行了深入地仿真分析。

2 现有的主要混沌保密通信方案

在现有的混沌保密通信方案中，混沌遮掩、混

沌参数调制和混沌键控保密通信系统得到了最广泛的研究。

2.1 混沌遮掩保密通信方案

混沌遮掩保密通信方式是 Cuomo 和 Oppenheim 最先研究的，成功实现了模拟电路保密通信。混沌遮掩保密通信系统在实际的应用中，电路的结构比较简单，同步的顽健性比较好，当传输小能量幅值信号时，从某种程度上可以实现信号的安全传输。但是如果发送的信号幅值能量大于 5V 时，通过分析信道中传输的混合有用信息的混沌载波的频谱信息，就会泄漏出发送信息的特征，就此失去了保密功能，可以看出混沌遮掩系统传输能量的利用率很低，而且混沌遮掩保密通信在实际中的应用局限于收发双方系统的严格同步，轻微的噪声干扰都会导致系统传输信号失步。

下面通过仿真分析混沌载波在遮掩能量幅值较大的有用信息时的情况，发送有用信息 $\sin(x)$ 的幅值能量为 15V，仿真结果如图 1 所示。

从仿真结果可以看出发送高能量幅值信号时，在通信信道中传输的时域信号就已经泄露了传输信号，通信系统基本不具有保密性。混沌遮掩保密通信系统对模拟信号或数字信号的加密方式并不安全，由于无论采用哪种加密方式，发送信息都要与混沌信号进行某种运算后直接在信道中传输，因此该通信方式的安全性能较低。以上这些缺点都表明目前混沌遮掩保密通信方案在实际应用中还不能提供高质量的信息安全传输。

2.2 混沌参数调制保密通信方案

1996 年，Yang 和 Chua 提出了一种用于数字信息安全传输的混沌参数调制保密通信系统。混沌参数调制数字保密通信方案的实现局限于同步技术的稳定性和参数的估计效果，发送的信息没有直接参与在传输信道中发送，而是利用混沌信号谱的整

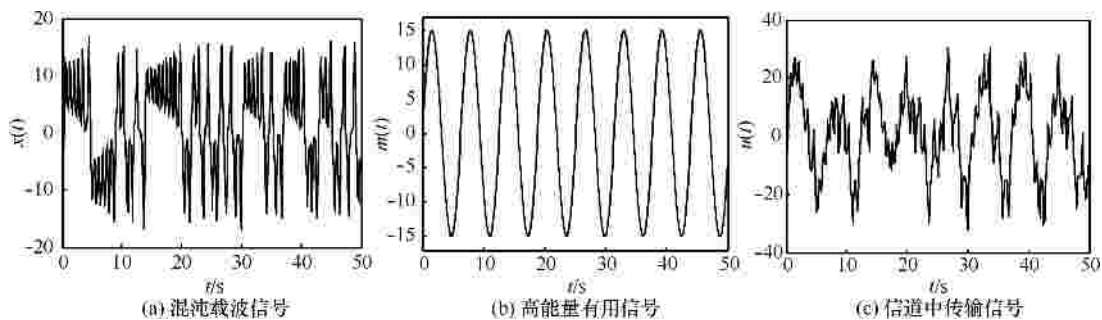


图 1 混沌遮掩传输较大能量信号时的仿真结果

个范围都用来加密传输信息，即发送信息直接隐藏在系统参数变量中，因此混沌参数调制通信方案的安全性能要优于混沌遮掩保密通信，但是整个同步系统对于参数变量的变化异常敏感，系统传输的误码率较高。

混沌参数调制保密通信实现的关键在于混沌系统参数变量的恢复程度，函数求逆法的采用使得其对信道的噪声非常敏感，因而通信效率也随之降低，而在实际应用中的噪声干扰必然会对同步传输产生影响，这一缺点严重制约着混沌参数调制在通信邻域的发展。随着混沌保密通信系统的深入研究，混沌参数调制还可以进一步采用多个参数变量来传输信息，多变量的通信方案拓宽了混沌参数调制的通信效率和应用范围，但是多个参数变量参与同步通信使得各个参数之间产生相互影响，导致误码率随之增加，所以现有的混沌参数调制通信方式应用于实际系统方案的传输非常困难。

2.3 混沌键控保密通信方案

Dedieu、Kennedy 和 Hasler 于 1993 年在国际上首先提出了混沌键控保密通信方式。混沌键控通信系统可以实现数字信号的安全通信，系统具有较好的抗干扰和抗参数失配的特性，而且克服了混沌遮掩和混沌参数调制中要求混沌载波功率远大于有用信号功率和对噪声干扰极其敏感的缺点，具有很好的发展前景和实际应用价值。混沌键控以其出色的通信性能，受到了广泛的关注和研究，目前发展得到的混沌键控通信方式主要有 COOK(混沌开关键控)、CSK(混沌移位键控)、DCSK、FM-DCSK(调频差分混沌键控)、CDSK、QCSK，其中 DCSK 和 CDSK 系统是最具有实际应用价值的通信方案。

CDSK 将系统参考信号与混有传输信息的延迟信号相叠加后统一发送，是混沌键控系统中安全性最高的通信方式，但是该通信方案的系统性能要比 DCSK 逊色^[15,16]。而 DCSK 是目前研究最多的键控通信系统，系统电路结构简单，误码率低，抗干扰能力强，这些优点都非常适合于实际系统传输。但是 DCSK 系统在一个信号传输周期内，其中发送参考信号用去了半个信号传输时间，系统带宽利用率和数据的传输速率都随之降低，而且该通信信道发送的信息信号只有携带信息信号和参考信号的同相和反相的区别，所以信道安全性较低，发送的信息被获取后通过相关攻击等数据分析很容易破译出传输信号^[17,18]。如何提高通信系统数据传输速

率，使运算结果相对稳定，同时减少误码率，是信号保密通信研究的努力方向，针对这些系统性能缺陷，文中对 DCSK 系统进行了改进，提出了 CD-DCSK 数字通信保密系统，同时对其通信性能进行了深入仿真分析。

3 包含信道噪声的新型 CD-DCSK 通信方案

新型的 CD-DCSK 数字保密通信系统原理框图如图 2 所示，该改进系统不但具有 DCSK 误码率低的优点，同时兼有 CDSK 的高安全性，而信道的数据通信速率是 DCSK 和 CDSK 系统的 2 倍。在一个符号周期内，CD-DCSK 系统分别将通过串并转换得到的高低位信号 a 、 b 映射到传输信息内，进而得到的频谱利用率是原来的 2 倍。高低位信号 a 和 b 分别代表传输“+1 +1, -1+1, +1-1, -1-1”信息的 4 种情况。在系统接收端，前半个时间周期内，传输信息 $s(t)_a$ 是混沌信号 $x(t)$ 与其延迟时间 $t/2$ 后经数字信号 a 调制后的信息信号 $ax(t-t/2)$ 的叠加；在后半个时间周期内，传输的 b 信号映射到延迟时间 t 后的混沌信号中，并叠加到原混沌信号上构成调制端发送的信号 $s(t)_b$ 。通过分析可以发现通信信道中传输的信号是均匀的，无重复信息，安全性能比 DCSK 要好得多，CD-DCSK 系统调制端的输出信号 $s(t)$ 为

$$s(t) = \begin{cases} x(t) + ax(t-t/2), & (l-1)T_b \leq t < (l-1/2)T_b \\ x(t) + bx(t-t), & (l-1/2)T_b \leq t < lT_b \end{cases} \quad (1)$$

在前后 2 个 $1/2$ 时间周期内，通信信道中没有重复信号的传输，始终是混沌信号及其经发送信息调制后并延迟的混沌信号的混合，因此发送信息的安全性得到了提高。而且在与 DCSK 系统同样的时间周期内，前后 2 个 $1/2$ 时间周期都有调制发送信息，由此系统信道的频带的利用率得到了提高，数据传输速率更是提高到了 DCSK 键控系统的 2 倍。

在系统解调端，通过相关器的积分相关域值运算，在第 l 个发送时间周期内，发送的信息 Z_a 和 Z_b 为

$$\begin{cases} Z_a = \int_{(l-1)T_b}^{(l-1/2)T_b} s(t)_a s(t-t/2)_a dt \\ Z_b = \int_{(l-1/2)T_b}^{lT_b} s(t)_b s(t-t)_b dt \end{cases} \quad (2)$$

通信信道中混入干扰噪声信号时，传输信息用 $s(t)$ 表示， $r(t)$ 为 $s(t)$ 混有噪声信号 $z(t)$ 时的信道发送信号，即相关判别器的输出 Z_a 和 Z_b 可以表

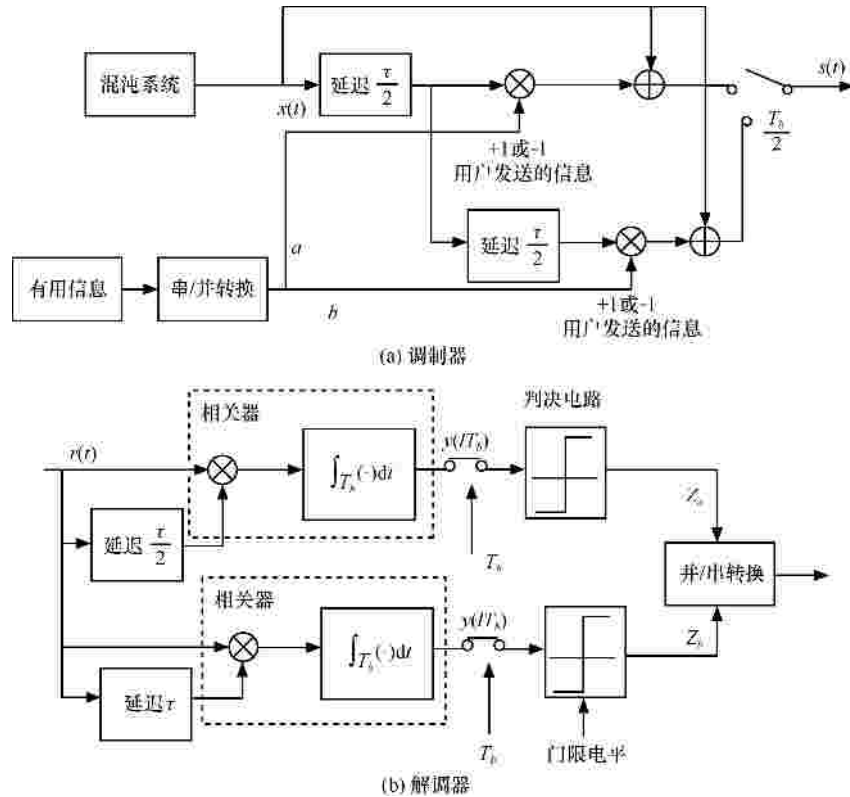


图 2 CD-DCSK 系统调制原理

示为

$$\begin{aligned}
 Z_a &= \int_{(t-1)T_b}^{(t-1/2)T_b} r(t)_a r(t-t/2)_a dt \\
 &= \int_{(t-1)T_b}^{(t-1/2)T_b} [s(t)_a + z(t)][s(t-t/2)_a + z(t-t/2)] dt \\
 &= \int_{(t-1)T_b}^{(t-1/2)T_b} s(t)_a s(t-t/2)_a dt + \\
 &\int_{(t-1)T_b}^{(t-1/2)T_b} s(t)_a z(t-t/2) dt + \\
 &\int_{(t-1)T_b}^{(t-1/2)T_b} s(t-t/2)_a z(t) dt + \\
 &\int_{(t-1)T_b}^{(t-1/2)T_b} z(t) z(t-t/2) dt
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 Z_b &= \int_{(t-1)T_b}^{(t-1/2)T_b} r(t)_b r(t-t)_b dt \\
 &= \int_{(t-1)T_b}^{(t-1/2)T_b} [s(t)_b + z(t)][s(t-t)_b + z(t-t)] dt \\
 &= \int_{(t-1)T_b}^{(t-1/2)T_b} s(t)_b s(t-t)_b dt + \\
 &\int_{(t-1)T_b}^{(t-1/2)T_b} s(t)_b z(t-t) dt + \\
 &\int_{(t-1)T_b}^{(t-1/2)T_b} s(t-t)_b z(t) dt + \\
 &\int_{(t-1)T_b}^{(t-1/2)T_b} z(t) z(t-t) dt
 \end{aligned} \tag{4}$$

通过分析相关器的输出 Z_a 和 Z_b 可以发现，式

中第一项即为携带发送信息的信号项，第二、三项分别表示信道噪声同混沌的相关域值积，而式中第四项为信道干扰自身的相关积项。通过分析混沌系统特有的性质，除式中第一项外，混沌信号 $s(t)$ 与信道干扰 $z(t)$ ，以及信道干扰 $z(t)$ 、 $z(t-t/2)$ 和 $z(t-t)$ 自身之间都是无关的，因此后面三项的积分值都是 0。将接收端的阈值门限判决为 0，当 Z_a 、 $Z_b > 0$ 时，能够解调出传输信息 a 或 b 为“+1”相反，当 Z_a 、 $Z_b < 0$ 时，则能够解调出 a 或 b 为“-1”，当然也可以选择判决为反相传输信号，这些都由通信双方协定即可，随后即由并/串转换，解调出发送信息。

文献[19,20]对 DCSK 键控系统的 BER 性能进行了很好地推理论证，在 CD-DCSK 键控系统的解调端，设进行相关阈值判决时的滤波器抽样时间间隔为 s ，发送端混沌序列的速率为 R_c ，在 $1/2$ 时间间隔内的采样数为 $T_b/(2s)$ ，则半个时间间隔内混沌样值的抽样数 M 是为

$$M = \frac{T_b/(2s)}{1/(R_c s)} = T_b R_c / 2 \tag{5}$$

在 T_b 内，CD-DCSK 键控系统发送信息速率是 DCSK 的 2 倍，而相关阈值判决的时间没有改变，

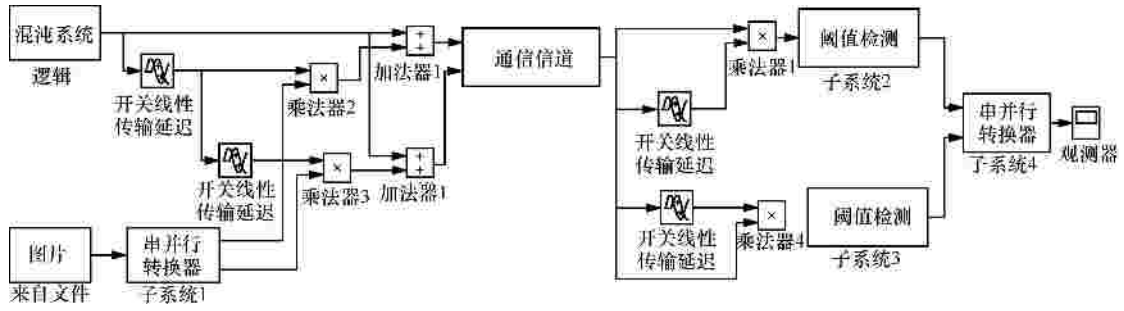


图 3 CD-DCSK 键控系统仿真

即 CD-DCSK 键控系统相关阈值积分的序列长度由 M 变为 $2M$ 。由此，在 AWGN 干扰信道中，CD-DCSK 键控系统的误码率为

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{4N_0} \left(1 + \frac{1}{5} \frac{2}{T_b R_t} \cdot \frac{E_b}{N_0} + \frac{N_0}{E_b} \cdot \frac{T_b R_t}{2} \right)^{-1}} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{4N_0} \left(1 + \frac{1}{5M} \cdot \frac{E_b}{N_0} + \frac{N_0}{E_b} M \right)^{-1}} \right) \quad (6)$$

4 仿真结果及分析

仿真时选择 logistic 为发射系统，在 MATLAB/Simulink 中搭建 CD-DCSK 键控系统仿真原理图如图 3 所示。在仿真框图中子系统 1、4 “deserializer”的功能是实现输出信号的并/串转换。

CD-DCSK 键控系统的发送信号如图 4 所示，系统的调制原理是将发送的信息“0, 1”序列映射为“+1, -1”序列，再通过信道发送，图 5 为接收端判决解调出的传输信息，因此可以从时域上判断系统很好地实现了数据的传输。在相同的系统传输时间中，DCSK 键控系统仅携带一个发送信息，而改进的 CD-DCSK 利用相关延迟时间差，同时携带 2 个发送信息，提高了频带的利用率和数据传输速率。

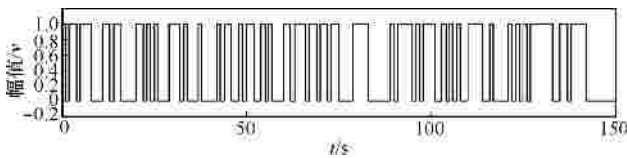


图 4 CD-DCSK 系统的发送信号

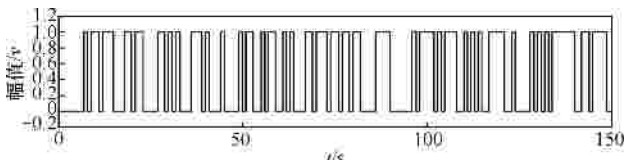


图 5 接收端解调出的传输信号

在通信信道中，COOK(混沌开关键控)、DCSK 和 QCSK 系统在相同时间间隔内发送的是 2 段同相或反相的混沌参考信息，即利用相关攻击等分析方法对发送信息的时域和频域进行分析，很容易解调传输数据。改进的 CD-DCSK 系统很好地借鉴了 CDSK 的调制原理，在信道中传输的是经过相关延迟叠加调制后的混沌信号，所以在传输信道中，没有重复混沌信号，保密性较其他系统得到了很大提高。如图 6~图 10 所示，对比判别在 COOK、DCSK、CDSK、QCSK 和 CD-DCSK 系统信道中传输的调制后的混沌信号，能够看出 CDSK 和 CD-DCSK 信道的安全性更高，而且 CD-DCSK 键控系统信道比特能量比 CDSK 和 QCSK 信道中信号能量更加均匀，解调接收端不会因系统能量随传输时间改变而导致估计问题的产生。而 COOK、DCSK 和 QCSK 系统信道传输调制后的混沌信号都会显露出传输数据的痕迹。

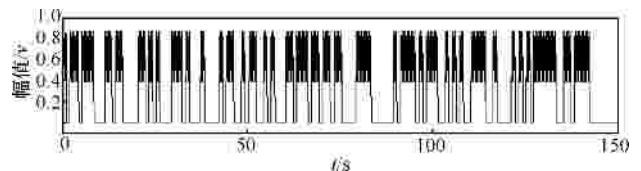


图 6 COOK 系统信道传输的调制后的混沌信号

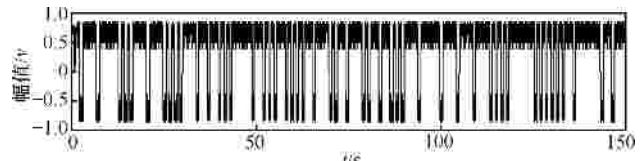


图 7 DCSK 系统信道传输的调制后的混沌信号

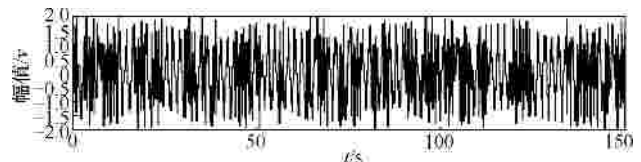


图 8 CDSK 系统信道传输的调制后的混沌信号



图 9 QCSK 系统信道传输的调制后的混沌信号

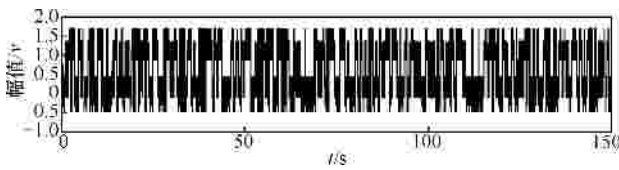


图 10 CD-DCSK 系统信道传输的调制后的混沌信号

通过文献[20,21]的分析讨论可知, DCSK 和 QCSK 键控系统的误码率性能最好。所以在这里仅需对比分析 DCSK、CDSK、改进的 CD-DCSK 系统和系统数据传输速率同 CD-DCSK 相当的 QCSK 系统在 AWGN 信道中的误码率性能, 仿真分析结果如图 11 所示。

由仿真结果可知, 在 AWGN 信道下, 相比较 CDSK 键控系统的数据传输的误码率最差, 而 QCSK 要优于 DCSK 通信系统。当信噪比(E_b/N_0)较小时, CD-DCSK 和 QCSK 的 BER 性能相当; 当 $E_b/N_0 > 8\text{dB}$ 时, 改进的 CD-DCSK 键控系统的 BER 性能较 QCSK 系统有很大提高, 而且当 E_b/N_0 提高时, QCSK 系统 BER 逐渐增大; 当 $BER = 10^{-3}$ 时, CD-DCSK 键控系统的信噪比比 QCSK 提高了 2.2~2.7dB。因此, CD-DCSK 的 BER 性能相比较于 QCSK、CDSK 和 DCSK 系统得到了提高。

CD-DCSK 仿真传输二值图像数据的结果如图 12 所示, 可以看出改进的 CD-DCSK 系统很好地实现了二值图像数据的保密传输。CD-DCSK 通信系统发送一个 256×256 像素的二值图像所需要的时间为 $256^2 \times T_b/2$, 与 QCSK 的数据传输速率相同。但是 QCSK 从通信原理上可以看作 2 个 DCSK 的组合, 与 DCSK 相比, 在一样的频带带宽的下, 利用 2 个正交混沌函数的生成, 发送信号的速率得到了提高, 基于 DCSK 的原理没有改变, 通过分析传输信号的频谱, 即可解调出发送信号, 因此改进后的 CD-DCSK 的保密性要远远好于 QCSK。而且 QCSK 键控系统硬件电路的仿真实现上要用到 2 个 Hilbert 变换, 在实际中非常复杂很难实现。

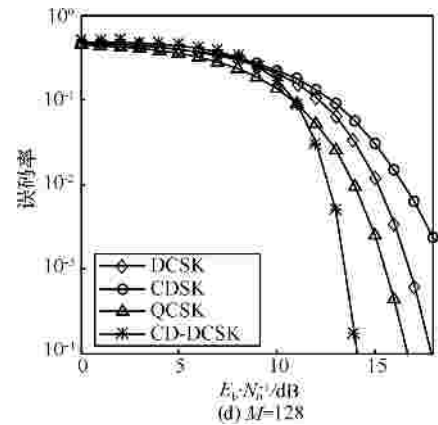
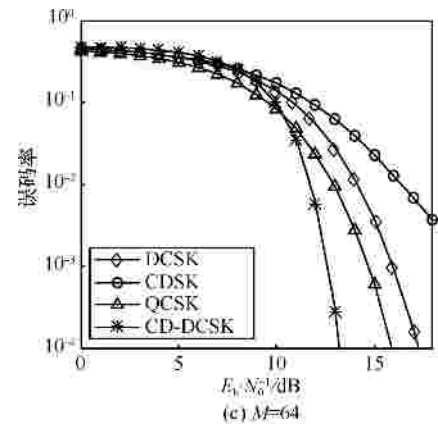
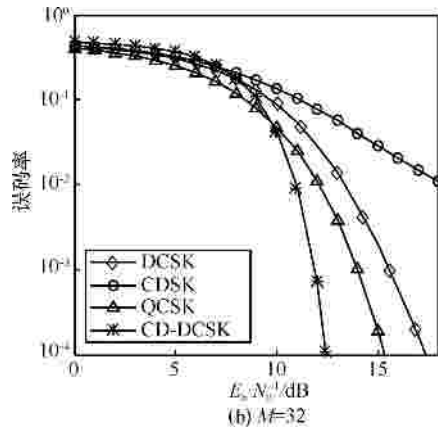
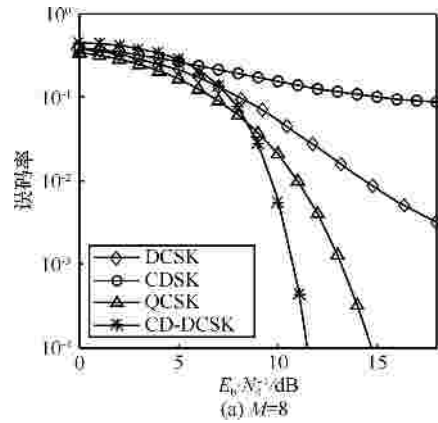


图 11 DCSK、CDSK、QCSK 和 CD-DCSK 系统误码率曲线比较

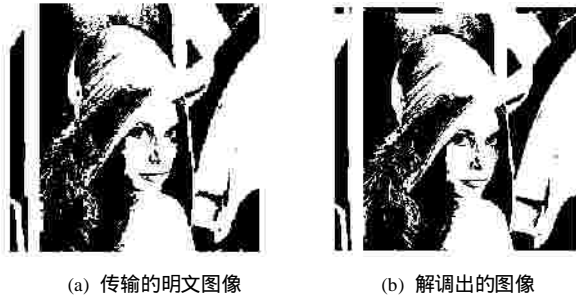


图 12 传输的图像信号

改进后的 CD-DCSK 键控系统发送数据信号的优点是传输的信息不会直接参与信道的传输，而是通过调制发送端混沌序列来实现的，有用信息没有直接混入信道中传输，因此 CD-DCSK 键控系统的安全性能要好于现有的混沌保密通信方式，也可以利用信道中发送的数据信号的自相关性，也就是计算在任意 2 个不同时刻通信信道中传输信号之间的相关程度，来判断系统的保密性。对比 CSK、DCSK、QCSK 和 CD-DCSK 信道系统中发送数据的自相关程度如图 13 所示。通过分析仿真结果可以看出，与之前讨论分析的相符合，改进得到的 CD-DCSK 键控系统的保密性最好。

5 结束语

本文提出了一种新型的混沌键控数字通信系统——相关延迟—差分混沌键控，通过对系统的多方面性能的仿真分析，验证了该新型的键控系统在数据传输速率、BER 性能和系统的保密性上较 CDSK、DCSK 和 QCSK 都得到了提高。混沌遮掩采用混沌序列作为载波，通过信道加密和混沌同步实现保密通信，但是无论采用哪种加密方式，发送信息都会直接混入信道中传输，通过线性滤波等相关攻击方式，就可以破译出发送数据。而改进得到的 CD-DCSK 系统传输的数据信号不会直接混入信道参与发送，信道中信号的能量也更加均匀，因此信道保密性更强。图像数据信号都是二维或三维类型的，与文本信息不同，负载的信息量非常大，而且有很高的冗余度，但是对信息数据发送的完整性要求并不十分严格，而在实际通信传输中对图像信号的数据发送速率和信道的保密性的要求比较高，考虑图像数据的这些特点，改进的 CD-DCSK 非常适合于应用到实际的混沌数字保密通信的图像视频的加密传输中。可见，这种改进是有意义的，而且易于实现，为混沌数字保密通信走向实用阶段奠定了基础。

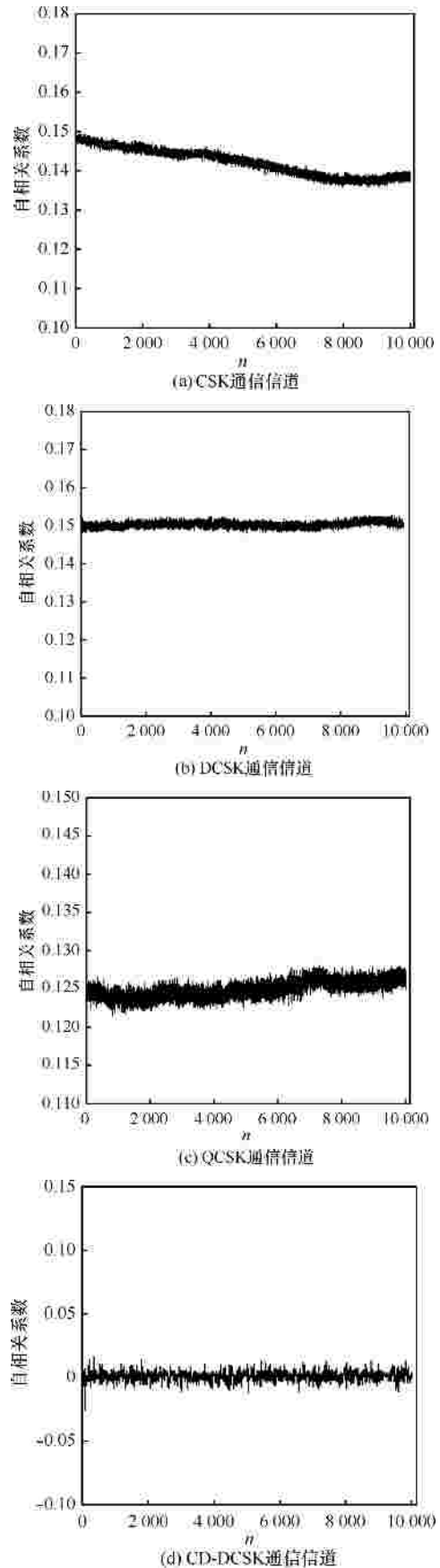


图 13 混沌键控信道中信号的自相关程度

参考文献:

- [1] LIU Y, TANG W K S. Cryptanalysis of chaotic masking secure communication systems using an adaptive observer[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2008, 55(11): 1183-1187.
- [2] HE S Y. The research of synchronization communication technology based on chaotic masking[A]. IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems[C]. 2009.267-270.
- [3] 于娜, 丁群, 陈红. 异结构系统混沌同步及其在保密通信中的应用[J].通信学报, 2007, 28(10):73-78.
YU N, DING Q, CHEN H. Synchronization of different structure chaotic systems and the application in secure communication[J]. Journal on Communications, 2007, 28(10):73-78.
- [4] 纪颀, 陆佳人. 基于混沌参数调制的数字通信方式[J].通信学报,1999, 20(11): 50-54.
JI B, LU J R. The digital communication method based on chaotic parameter modulation[J]. Journal on Communications, 1999, 20(11): 50-54.
- [5] ALVAREZ G, MONTOYA F, ROMERA M, *et al.* Breaking two secure communication systems based on chaotic masking[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2004, 51(1) 505-506.
- [6] TAM W M, LAU F C M, TSE C K. Generalized correlation-delay-shift-keying scheme for noncoherent chaos-based communication systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2006, 53(3): 712-721.
- [7] CHEN L M, XU W K, WANG L. Performance of improved FM-DCSK system based on differential-coding method[A]. International Conference on Communications, Circuits and Systems[C]. 2008. 1224-1227.
- [8] CHEN S Y, WANG L, CHEN G. Data-Aided timing synchronization for FM-DCSK UWB communication systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(5):1538-1545.
- [9] 韩建群, 朱义胜. 一种提高调频差分混沌移相键控调制传输效率方法[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1032-1035.
HAN J Q, ZHU Y S. A kind of method for enhancing the transmission efficiency in FM-DCSK[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1032-1035.
- [10] LI H, SI F F. UWB DCSK system design and simulation[A]. IEEE International Conference on Test and Measurement[C]. 2009.311-314.
- [11] MIN X, XU W, WANG L, *et al.* Promising performance of a frequency-modulated differential chaos shift keying ultra-wideband system under indoor environments[J]. IET Communications, 2010, 4(2):125-134.
- [12] ARAI S, NISHIO Y. Noncoherent correlation-based communication systems choosing different chaotic maps[A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C]. 2007. 1433-1436.
- [13] 王光义. 混沌数字通信研究新进展[J]. 计算机工程与应用, 2003,39(21): 28-30.
WANG G Y. New progress for researching chaos-based digital communications[J]. Computer Engineering and Applications, 2003,39(21): 28-30.
- [14] WREN T J, YANG T C. Orthogonal chaotic vector shift keying in digital Communications[J]. IET Communications, 2010, 4(6): 739-753.
- [15] 葛志平, 蒋铃鸽, 何晨. 一种改进的差分混沌键控通信方案及其性能分析[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38:14-18.
GE Z P, JIANG L G, HE C. An improved scheme of differential chaos shift keying and performance analysis[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38:14-18.
- [16] TAM W M, LAU F C M, TSE C K. Generalized correlation- delay-shift-keying scheme for noncoherent chaos-based communication systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2006, 53(3): 712-721.
- [17] 谭伟文, 刘重明, 谢智刚. 数字混沌通信——多址方式及性能评估[M].北京:科学出版社, 2007.
TAN W W, LIU C M, XIE Z G. Digital Chaotic Communication—Multi-Access Way and Performance Evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [18] 李辉. 混沌数字通信[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.35-46.
LI H. Chaos Digital Communication[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.35-46.
- [19] GALIAS Z, MAGGIO G M. Quadrature chaos-shift keying: theory and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2001, 48(12): 1510-1519.
- [20] LAU F C M, YE M, TSE C K, *et al.* Anti-jamming performance of chaotic digital communication systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(10): 1486-1494.

作者简介:



朱勇(1974-),男,黑龙江哈尔滨人,黑龙江大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为加密算法与系统集成、无线通信、NFC技术和RFID技术等。

王佳楠(1985-),女,黑龙江延寿人,黑龙江大学硕士生,主要研究方向为混沌保密通信和网络信息安全。

丁群(1957-),女,黑龙江哈尔滨人,黑龙江大学教授、博士生导师,主要研究方向为混沌加密算法与系统集成、加密信号分析、混沌保密通信和网络信息安全等。