

文章编号: 1000-5013(2007) 03 0246- 06

陈-Möbius 四路载波数字通信系统的仿真

苏武浔, 陈 方, 魏腾雄

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 将几种常用数字波形的陈 Möbius 逆变换作为四路载波数字通信系统数字输入信号的编码波形函数族, 由其对二进制输入信号进行调制后, 直接叠加在一个物理信道上进行传输. 在接收端, 用与各调制编码波形对应正交的数字波形对各路信号进行同步相干解调, 从而构成新的相干调制解调系统. 应用 MATLAB 平台对系统进行性能仿真, 并传统的相干调制解调系统的仿真结果相比较. 结果表明, 该系统具有更优异的抗强噪声与抗干扰的性能, 可实现多路载波数字通信的直接叠加, 大大节省系统的初始投资与运行费用.

关键词: 载波数字通信; 陈 Möbius 逆变换; 调制解调系统; 波形函数

中图分类号: TN 911.5; TN 919.6+ 4; TP 391.9 文献标识码: A

近年来, 我国著名学者陈难先院士开创了应用、推广数论中的 Möbius 变换, 解决物理学中各种逆问题的方法^[1-4]. 这种方法被应用于多种数字波形的逆变换计算^[5], 得到了与各种数字波形相正交的函数族; 此外, 也有研究者将 Möbius 变换应用于对数字波形的分析^[3, 6], 但仅停留在理论上. 文[7-8] 将两个相互正交的函数族作为新型的调制解调系统, 应用于模拟与数字通信系统中, 得出了初步的结果. 本文在此基础上将其推广到四路载波数字通信系统, 并对系统的一般性能应用 MATLAB 平台进行仿真研究, 给出应用各种函数族系统的位错率- 信噪比的曲线, 并传统系统相比较.

1 相干调制解调系统

把文[7-8] 的工作推广到多路载波数字通信系统, 其系统框图如图 1 所示. 图 1 中, 左边的乘法器 $A_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 处, 系统需实现 $f_n(t) \tilde{S}_{d,n}(t) = F_n(t)$ 的功能. 这里, $f_n(t)$ 是输入的二进制数字信号, 而 $\tilde{S}_{d,n}(t)$ 是 $S_d(nt)$ 的陈-Möbius 逆变换, 即 $\tilde{S}_{d,n}(t) = \sum_{m: n} I(n/m) \cos mt$, 或者 $\tilde{S}_{d,n}(t) = \sum_{m: n} I(n/m) \sin mt$. 其中, $I(n/m)$ 是经逆变换计算得到的系数, $\sum_{m: n}$ 表示对 n 的所有整数因子求和, 包括 1 和 n 本身. $S_d(nt)$ 是几种常用数字信号波形之一, 本文应用了偶、奇对称方波, 偶、奇对称三角波与锯齿波等 5 种波形; $\tilde{S}_{d,n}(t)$ 与 $S_d(nt)$ 是相互正交的. 在经过传统的传输部分后, $\sum_n F_n(t) + n(t)$ 到达右边乘法器 $B_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 处, 系统实现的功能表示为

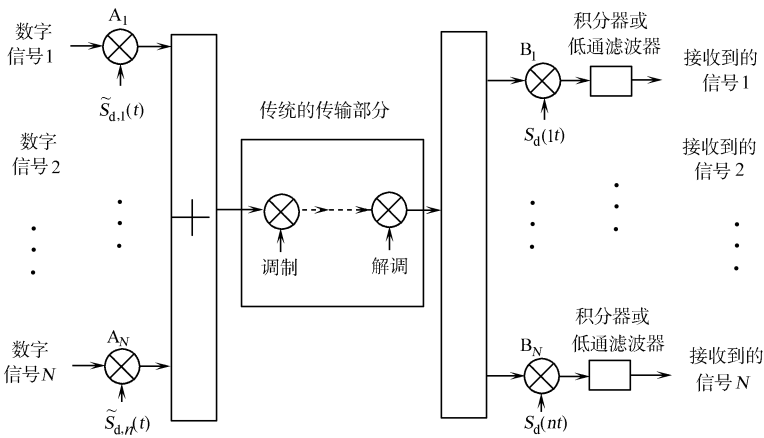


图 1 陈 Möbius 多路载波数字通信系统
Fig. 1 The Chen Möbius multi carriers
digital communication system

$$\int_0^T [\sum_n F_n(t) + n(t)] S_d(nt) dt = \int_0^T [\sum_n f_n(t) \tilde{S}_{d,n}(t) + n(t)] S_d(nt) dt =$$
$$f'_n(t) = f_n(t) + \varepsilon_n(t).$$

经低通滤波器或积分器后, 解调后的信息 $f'_n(t)$ 被输出, $\varepsilon_n(t)$ 表示由噪声所引起的误差.

2 系统的性能仿真

为了模拟四路载波数字通信系统的实际情形, MATLAB 平台中的分配器与时分复用或频分复用的方式都没有采用, 而是把信号直接叠加在线路中传输. 应用 MATLAB 中的 SIMULINK 工具箱对陈 Möbius 通信系统进行建模与仿真后, 如图 2 所示. 在图 2 中, 左边乘法器输入端口 1~4 输入的是调制信号 $\tilde{S}_{d,n}(t)$, 实现系统的调制功能; 右边乘法器输入端口 1'~4' 输入的是解调信号 $S_d(nt)$, 实现系统的

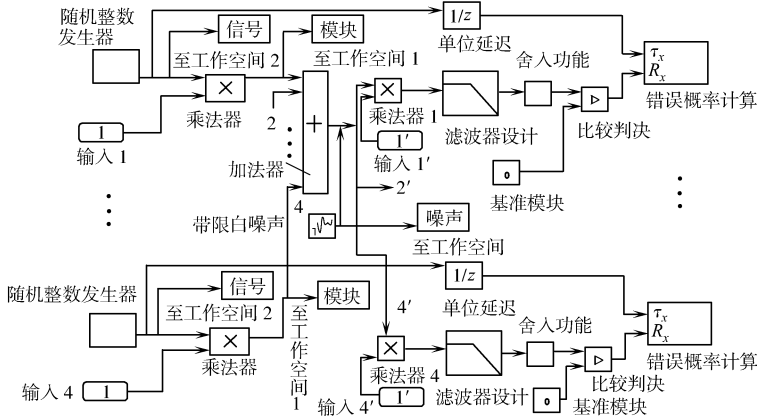


图 2 四路载波数字通信系统的仿真方案

Fig. 2 The simulation scheme of four carriers digital communication system

解调功能. 最左边的随机整数发生器模块用来生成仿真输入信号的二进制信号, 中间部分的带限白噪声产生模块用来产生系统模拟的外加带限白噪声, 加法器把模拟的带限白噪声加入到系统中. 至工作空间、至工作空间 1、至工作空间 2 的 3 个模块, 分别把信号名为噪声、模块、信号的 3 个信号的采样值输出到 MATLAB 空间, 这样有利于对系统的编程计算和后续数据的处理. 右边的滤波器设计模块实现对系统的滤波功能, 舍入功能模块用来对低通滤波器的输出进行四舍五入运算, 比较判决模块作为判决模块, 对输出的信号进行判决. 输出端口用错误概率计算模块来代替, 其内部的变量名为 ErrorVec. 单位延迟模块是为了使输入与输出同步, 这样位错率的计算才有实际的意义.

为了方便比较, 我们采用 $n = 10$ 的 $\tilde{S}_{d,n}(t)$ 和 $S_d(nt)$ 、基频 $f_0 = 1\,000\text{ Hz}$ (最高频率为 10 kHz) 的调制和解调信号且解调信号 $S_d(nt)$ 的幅值为 1. 在仿真过程中, 系统的采样时间为 $0.1\text{ }\mu\text{s}$, 一次的仿真时间为 10 s , 随机整数生成器模块产生随机的均匀分布的二进制数字信号, 带限白噪声模块产生系统所需的带限白噪声 (噪声功率可以随意设定), 两个乘法器分别实现系统的调制和解调功能. 对系统进行仿真时, 设定随机整数生成器所产生的二进制信号功率一定, 而改变带限白噪声模块产生的噪声功率, 这样系统得到的信噪比 (SNR) 就会随着噪声功率的改变而改变. 通过计算机编程运算, 可以得到在不同信噪比条件下系统的位错率, 然后应用 MATLAB 拟合来绘制出系统的信噪比-位错率曲线.

在本实验的四路仿真中, 没有用到时分复用或频分复用, 而是简单地把 4 个支路的信号用加法器叠加起来, 这在计算位错率时显得有点麻烦. 因为当计算某一路的信噪比时, 其他 3 路的信号相对于这一路也属于噪声. 我们这样做的目的是, 验证陈 Möbius 数字通信系统超强的抗噪性能. 在确定了 $\tilde{S}_{d,n}(t)$ 和 $S_d(nt)$ 信号后, 系统仿真框图存为 Möbiuscom four. mdl, 并对应用 5 种常用函数族 (偶、奇对称方波, 偶、奇对称三角波和锯齿波函数族) 的调制解调系统进行仿真 (其 MATLAB 仿真源程序略). 在运行完程序之后, 对保存的信噪比和位错率的数据进行处理, 就可以画出各个系统的每个支路在此系统中的信噪比-位错率曲线 (所得曲线为 1 万次仿真的平均值). 我们所用的 5 种调制解调函数族, 分别是偶、奇对称方波, 偶、奇对称三角波和锯齿波函数族及其逆变换函数族, 当 $n = 10$ 时, 其波形如图 3 所示.

3 仿真结果

为了对系统的一般性能进行研究, 我们对每一函数族都选择 8 个信号. 即基频确定, 但最高频不定的 8 个信号, 然后将这 8 个信号分成 6 个组合, 每组 4 个, 连其逆变换作为每次仿真的调制解调函数族, 绘制出它们的信噪比 (R_{SN})- 错误概率 (P_b) 曲线, 如

图 4 所示. 同一函数族中 6 个组合的信号的最高频是基频(1 kHz)的 x 倍, 组合(1)的 x 为 3, 4, 5, 6; 组合(2)的 x 为 7, 8, 9, 10; 组合(3)的 x 为 3, 4, 7, 8; 组合(4)的 x 为 5, 6, 9, 10; 组合(5)的 x 为 3, 5, 7, 9; 组合(6)的 x 为 4, 6, 8, 10. 从上述四路仿真的结果来看, 对同一函数族的不同组合, 曲线的趋势是相同的; 而在同样的带宽和扩频增益条件下, 三角波函数族调制解调系统的性能最优, 其次是方波函数族调制解调系统, 最后是锯齿波函数族调制解调系统. 从图 4 可以看出, 锯齿波函数族调制解调系统的信噪比- 位错率曲线的趋势走向与其他的系统不太一致, 这主要是由软件的仿真的精度导致的, 即在频率很高时, MATLAB 生成的锯齿波函数有所失真. 但即便如此, 锯齿波函数族调制解调系统的各个支路在信噪比为负分贝时, 位错率都能以不同的速度逼近于零. 这在传统的各个支路简单叠加的多路通信系统中是很难办到的.

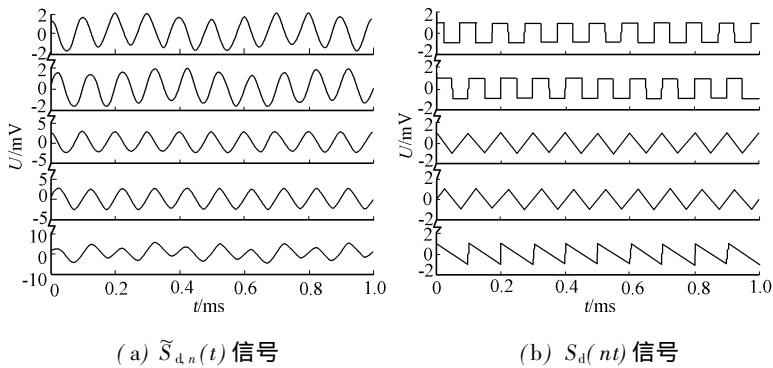
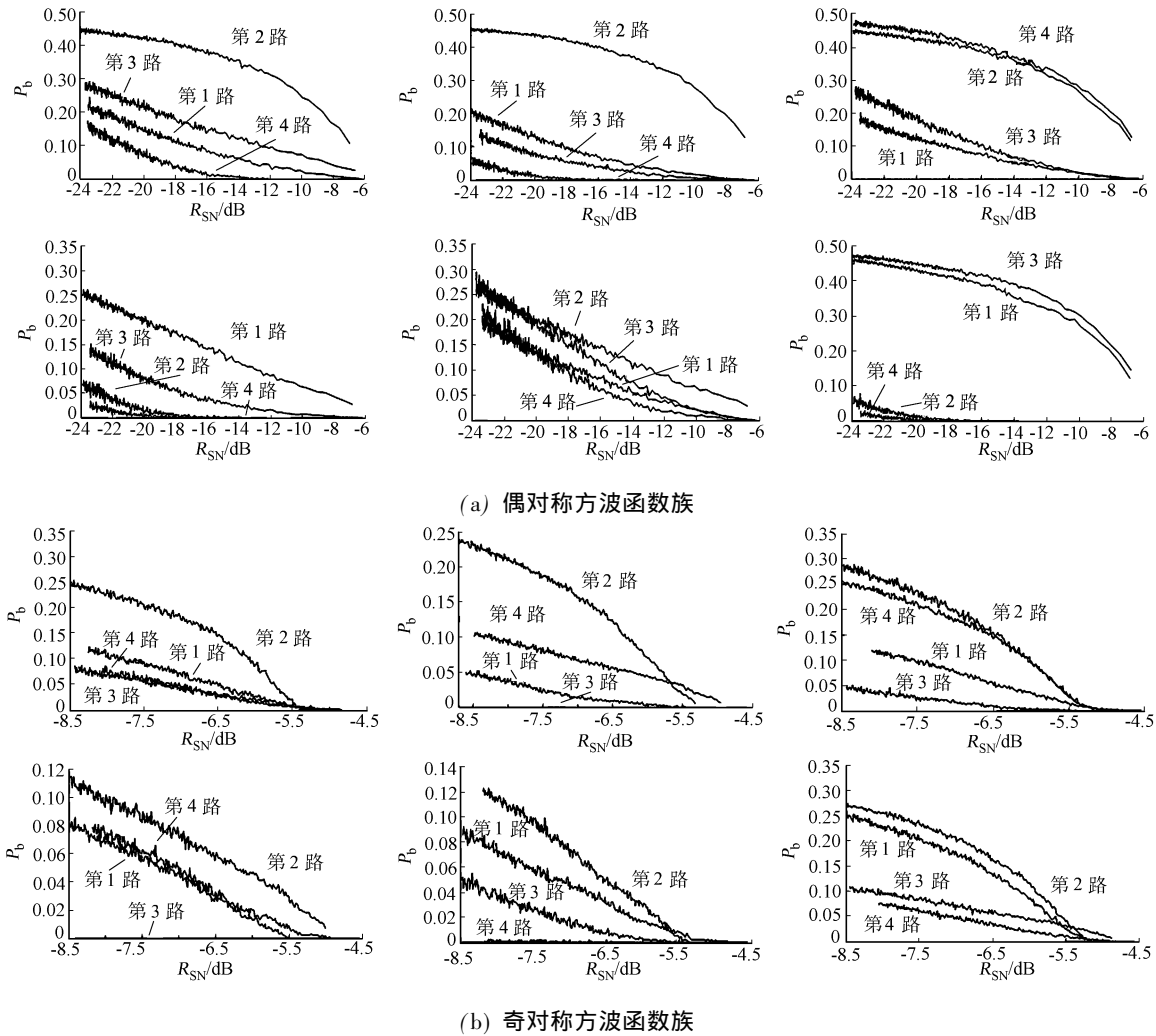


图 3 5 种函数族的波形信号

Fig. 3 The signal waveforms of 5 function set



(b) 奇对称方波函数族

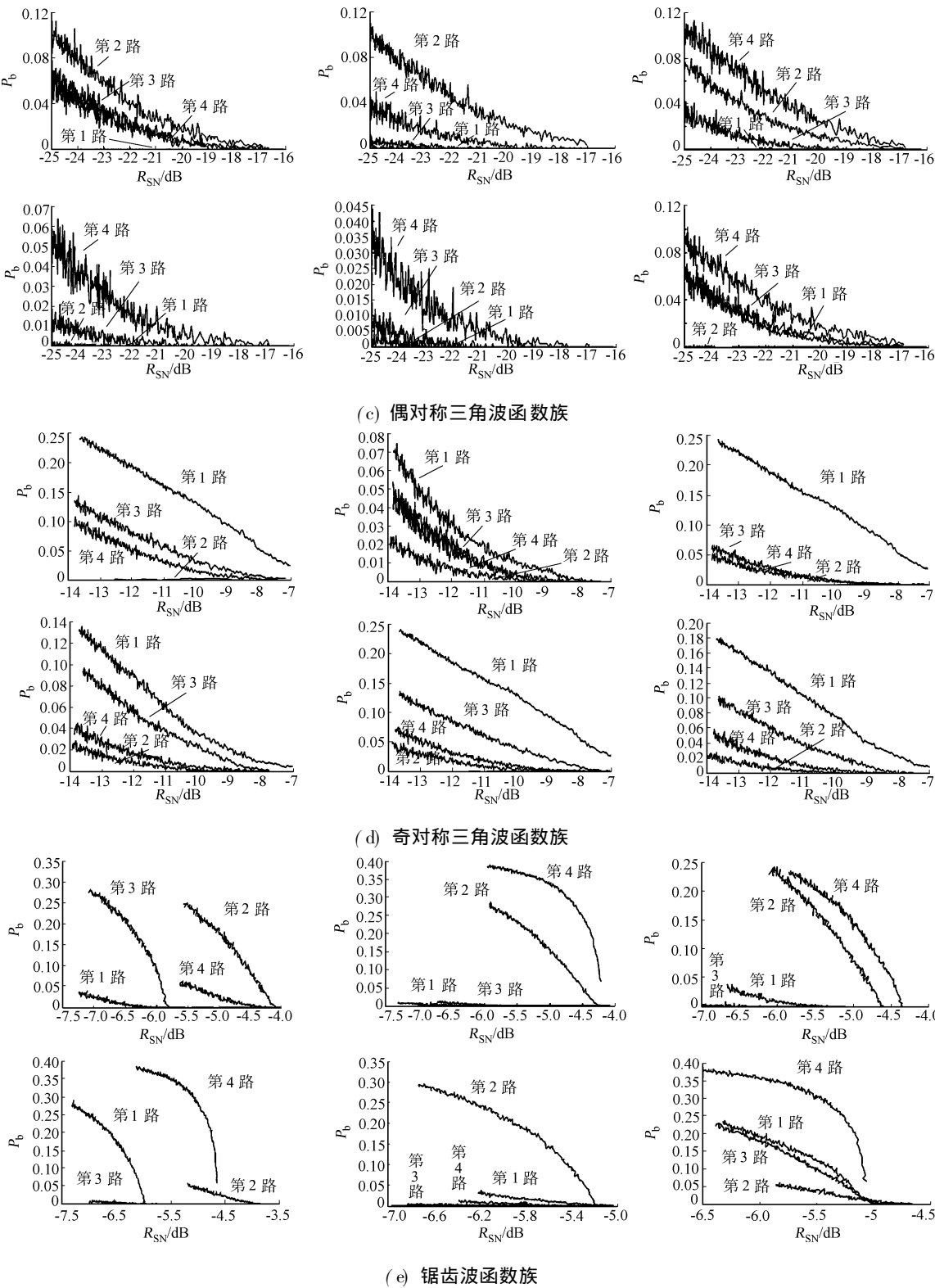


图 4 调制解调系统信噪比-错误概率曲线

Fig. 4 The error rate of signal to noise of modem system

4 系统比较与分析

为了把陈 Möbius 数字通信系统与传统的调制解调通信系统进行比较, 我们以单路通信系统为例进行仿真比较. 单路仿真的方案与四路中的每一路的情形相同, 只是在对陈 Möbius 数字通信系统进行仿真时, 输入端口 IN1 输入的是我们所用的 5 种函数族的调制信号 $\tilde{S}_{d,n}(t)$, 输入端口 IN1' 输入的是对

应的 5 种函数族的解调信号 $S_d(nt)$; 而对传统系统进行仿真时, 把 $\tilde{S}_{d,n}(t)$ 信号和 $S_d(nt)$ 信号都换成传统的正弦函数信号, 其频率与新系统的最高频率 10 kHz 相同. 在仿真过程中, 系统的采样时间为 0.1 μ s, 一次的仿真时间为 10 s, 随机整数生成器模块产生随机的、均匀分布的二进制数字信号, 带限白噪声模块产生系统所需的带限白噪声(噪声功率可随意设定), 两个乘法器分别实现系统的调制和解调功能.

在仿真条件和仿真方法与陈 Möbius 数字通信系统相同的条件下, 改变传统调制解调系统的信噪比, 通过计算机编程, 计算出其位错率, 从而画出信噪比-位错率曲线. 图 5 就是在相同的仿真条件下, 通过计算机编程所得到的陈 Möbius 数字基带通信系统与传统的通信系统的信噪比-位错率曲线. 所得曲线也是 1 万次仿真的平均结果. 为使曲线看得更清楚, 我们将其分成两幅图来表示. 图 5(a), (b) 分别是系统信噪比在 0 dB 以下和 0 dB 以上时, 采用 5 种陈 Möbius 变换函数族的调制解调系统与传统系统的

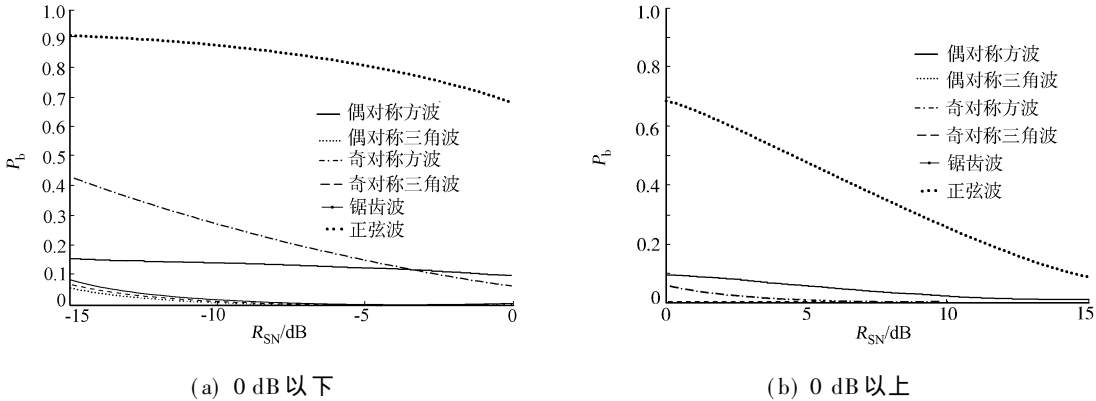


图 5 新系统与传统系统的位错率曲线

Fig. 5 The bit error rate comparison of new system with traditional system

位错率曲线图. 在图 5(a), (b) 中, 最上面的一条曲线是传统通信系统的信噪比-位错率曲线. 由图 5 可看到, 陈 Möbius 数字通信系统比传统的通信系统的抗噪性能要好得多. 首先, 在信噪比一定的条件下, 陈 Möbius 系统的位错率要比传统的通信系统小很多, 并且随着信噪比的增加能够很快逼近于零, 其性能最优良的系统, 已接近最佳系统的水平. 其次, 在位错率一定的条件下, 陈 Möbius 系统所需的信噪比要远比传统的通信系统小. 这意味着, 同样的一条物理信道, 在新系统中可以比传统系统同时传输更多的信号, 可以几倍、十几倍地提高系统的性价比, 或者大大降低系统的初始投资.

对于陈 Möbius 数字通信系统的明显优势, 我们分析如下: 首先, 对于传统的调制解调系统, 其调制解调函数族是同一个函数族, 即正、余弦函数. 正、余弦函数与 1 构成了一个完备的正交集. 这就是说, 不仅它们之间是相互正交的, 而且本身也是正交的. 因此, 在进行同步相干解调时, 噪声中的同频分量肯定会被解调出来, 也就增加了解调出来信号中的噪声功率, 当然也就降低了系统的性能. 对于新型的系统, 虽然 $\tilde{S}_{d,n}(t)$ 和 $S_d(nt)$ 信号是相互正交的, 而它们各自本身的函数族却是不正交的. 噪声信号都是随机的, 其与 Möbius 系统的解调波 $S_d(nt)$ 要完全正交是很困难的, $S_d(nt)$ 是数字信号, 从傅里叶分析的观点看, 其频谱有极其广泛的分量. 在做相干解调时, 各个频谱分量上的噪声也都会被解调出来, 但由于噪声的随机性, 其总的平均值会接近于零. 因此, 增加到信号上的噪声功率自然就小了, 信噪比的提高就会大大提高新系统的性能.

另外一个因素是, 新系统的调制波 $\tilde{S}_{d,n}(t)$ 是由几个具有确定数量关系的频率分量构成的, 几个频率分量在信号解调的构成中, 信号有集成相加的作用. 然而, 由于噪声的随机性, 可能有相互抵消的作用, 这也会增加系统的信噪比, 其代价是要增加信号传输的带宽. 如本文仿真中所选择的是 $n=10$, 那么系统传输的带宽就只须实现调制时的 10 倍. 这从理论上说, 也可认为是另一种方式的扩频, 从香农公式看, 它也会提高信噪比, 进而增强系统的性能. 在本文的新型系统与传统系统的比较中, 传统系统的带宽与新型系统是一样的, 故新系统性能的优越主要是由于前面的原因.

5 结论

本文可以得出的结论是, 把常用数字信号的陈 Möbius 变换的计算结果应用于多路载波数字通信

系统中,就是要在通信系统中加入新型的调制解调系统——陈 Möbius 相干调制解调系统. 它把得到的数字波形的陈 Möbius 逆变换作为数字信号的编码波形函数族,而在接收端,用与各调制编码波形对应的数字信号组成解调函数族,对各路信号进行同步相干解调,从而构成新的相干调制解调系统,但每一个函数族本身却是非正交的. 对这种新型的陈 Möbius 数字通信系统性能的计算机仿真表明,与传统的系统比较,该系统具有优异得多的抗强干扰性能. 并且,在信噪比是 0 dB 以下时,所用的各函数族系统的位错率曲线都能达到 0,这是传统系统根本无法达到的,而性能最佳的函数族系统已接近数字系统在理论上的最佳水平. 因此,它在实际的通信中,可作为零位错率的通信系统,实现多路载波数字通信的直接叠加,节约系统的大量初始投资与运行费用.

中国科学院院士、清华大学物理系 陈难先教授对本文的工作悉心指导,特此致谢!

参考文献:

- [1] CHEN Nan xian. Modified Möbius inverse formula and its applications in physics[J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(11): 1193-1195.
- [2] CHEN Nan xian. Closed form solution for inverse problems of Fermi systems[J]. Phys Rev E, 1993, 48(2): 1558-1561.
- [3] WEI Yur cuna, CHEN Nan xian. Square wave analysis [J]. J Math Phys, 1998, 39(8): 4226-4245.
- [4] 陈难先, 刘 刚. Fermi 体系逆问题的一种新解法[J]. 自然科学进展, 2003, 13(5): 473-477.
- [5] SU Wuxun, ZHANG Weibin, WANG Jiacheng. The evaluations of the inverse transform of eight often used waveforms by Möbius transform the inverse transform of their Fourier series [J]. Chinese Journal of Electronics, 2005, 14(3): 513-518.
- [6] 王 刚, 张 军, 张其善. 非正弦函数理论及其在通信中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [7] WEI Teng xiong, SU Wuxun. The applications of the Möbius transforms of some often used waveforms in analog communication systems [J]. Chinese Journal of Electronics, 2005, 14(4): 666-670.
- [8] WEI Teng xiong, SU Wuxun, GUO Jie min. The Chen Möbius digital communication system and it's simulations on computer [J]. Chinese Journal of Electronics, 2006, 15(4): 701-706.

Chen Möbius Four-Carriers Digital Communication System and Its Simulation

SU Wuxun, CHEN Fang, WEI Teng-xiong

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The Chen Möbius inverse transform function set of the digital waveform is used as the code waveform function set of the input digital signal in the four carriers digital communication system and the input binary digital signals modulated by each carrier are directly added together and transmitted through a physical line. At the receiving end, the digital waveforms respectively orthogonal to the corresponding code waveforms are used to coherently demodulate the signals on each carrier. These two orthogonal function set constitute the new coherent modem set pair. Then the new type four carrier digital communication system performance is simulated by the MATLAB platform and compared with the simulation result of the traditional system. The results of the comparison show that the new system has much more excellent performances to resist the strong noise and interference and the directly added multi-carriers digital communication could be realized and the system initial investment and the operation cost could be greatly saved.

Keywords: carrier digital communication; Chen Möbius inverse transform; modem system; waveform function

(责任编辑: 黄仲一)