

文章编号: 1001-893X(2012)06-0943-05

结合 RS 纠错编码和 Walsh 变换的软扩频技术*

唐大宇

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要:为了解决实际工程中信号被干扰的问题, 增强纠错能力, 并提高保密性, 提出了一种结合了 RS 纠错编码和 Walsh 变换的软扩频技术。通过对 RS 纠错编码产生和利用 Walsh 函数与复合码技术的 Walsh 变换方法的研究, 以及和一般直扩频的比较, 利用 Matlab 仿真阐述了软扩频技术的优势, 并介绍了这种软扩频技术在实际工程中的应用。

关键词:软扩频; RS 纠错编码; Walsh 变换; 复合码

中图分类号: TN914.4 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.06.022

Soft Spectrum Spreading Technique Combining RS Error-correction Coding and Walsh Transforming

TANG Da-yu

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: In order to solve signal interference in practical engineering and improve error-correction as well as encryption capability, a soft spectrum spreading technique combining RS error-correction coding and Walsh transform is proposed. Through RS error-correction codes generation, Walsh transform method research with help of Walsh function and composite coding, and comparison with conventional direct spectrum spreading, advantage of soft spectrum spreading technique is discussed based on Matlab simulation. Furthermore, practical engineering is also introduced.

Key words: soft spectrum spreading; RS error-correction coding; Walsh transform; complex code

1 引言

扩频技术在现代数据通信中有着广泛的应用。扩频一般分为直接序列扩频和跳频两种, 而软扩频是一种基于直接序列扩频、结合编码技术衍变而来的扩频技术, 因为其具有的高保密性和强抗干扰能力^[1], 被越来越多地应用在信号处理等实际工程中。

一般的直扩系统的实现是将信息码与伪随机码进行模 2 加来获得扩展后的序列, 但是, 软扩频是不一样的, 软扩频一般采用编码的方法来完成频谱的扩展, 即用几位信息码元对应一条伪随机码。软扩频的

实质是 (N, k) 编码, 是用序列长度为 N 的伪随机序列与 k 比特的数据编码一一对应, 是从信息空间向伪随机编码空间的映射, 两个空间都是 2^k 维的有限元空间, 信息空间的元素与伪随机码空间的元素一一对应。与一般直扩系统不同, 其扩频增益比较小, 且不为整数, 伪随机码空间的 2^k 个长为 N 的伪随机码是正交的, 因此, 软扩频又可称为正交扩频。

软扩频因为结合了编码, 所以软扩频的方法非常多, 本文介绍一种结合了 RS 纠错编码^[2] 和 Walsh 变换^[3] 的软扩频技术。本文从 RS 纠错编码和 Walsh 变换的基本原理出发, 深入分析其变换过程, 并使用一种采用复合码技术的改善 Walsh 变换, 来

* 收稿日期: 2012-02-20; 修回日期: 2012-05-15

提高这种软扩频技术的性能。

2 RS 纠错编码

RS 纠错编码是一类纠错能力很强的多进制 BCH 码,不但可以纠正随机错误、突发错误以及二者的组合,而且可以用来构造其他码类。在 RS(n, k)码中,输入信号分为 $k \cdot m$ 比特一组,每组包括 k 个符号,每个符号由 m 比特组成。一个纠 t 个符号错误的 RS 码有如下参数:码长(n 符号或 nm 比特);信息段(k 符号或 km 比特);监督段($n - k = 2t$ 符号或 $m(n - k)$ 比特);最小码距($d = 2t + 1$ 符号或 $m(2t + 1)$ 比特)。

域在 RS 编码中起着重要的作用,每个符号都可以看成是域中的一个元素,RS 编码的运算都是定义在域中,域 $GF(2^m)$ 有 2^m 个符号,设 $2^m = q$, $GF(2^m) = [0, \alpha^0, \alpha^1 \cdots \alpha^{q-2}]$,下面构建一个 m 为 4 的伽罗华域;设 $m = 4$,本原多项式 $p(x) = x^4 + x + 1$,因为 α 为 $p(x)$ 的根,可以得到 $\alpha^4 + \alpha + 1 = 0$,即 $\alpha^4 = \alpha + 1$,由此可得域中的元素如表 1 所示。

表 1 伽罗华域
Table 1 Galois Field

GF(16)单元	二进制码	十进制值
0	0000	0
α^0	0001	1
α^1	0010	2
α^2	0100	4
α^3	1000	8
α^4	0011	3
α^5	0110	6
α^6	1100	12
α^7	1101	11
α^8	0101	5
α^9	1010	10
α^{10}	0111	7
α^{11}	1110	14
α^{12}	1111	15
α^{13}	1101	13
α^{14}	1001	9

RS 码的生成多项式为

$$g(x) = (x + \alpha)(x + \alpha^2) \cdots (x + \alpha^{2t}) \tag{1}$$

式中, α^i 为伽罗华域 $GF(2^m)$ 中的一个元素。假设一种 RS(15,9)编码,即输入信号为 9 位,每位 4 bit,变换后为 15 位,纠错能力为 3 位,生成多项式为

$$g(x) = x^6 + \alpha^{10}x^5 + \alpha^{14}x^4 + \alpha^4x^3 + \alpha^6x^2 + \alpha^9x + \alpha^6 \tag{2}$$

从二进制码的角度来看,这是一个 (60,36) 码,经过编码后生成 6 位 RS 纠错码,和 9 位的输入信号组合成一个 15 位的信号。编码采用公式:

$$(D_1 D_2 D_3 D_4 D_5 D_6 D_7 D_8 D_9 D_{10} D_{11} D_{12} D_{13} D_{14} D_{15}) = (d_1 d_2 d_3 d_4 d_5 d_6 d_7 d_8 d_9) \times G \tag{3}$$

其中, G 为生成矩阵,表示为

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x^{14}(\text{mod } g(x)) \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x^{13}(\text{mod } g(x)) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x^{12}(\text{mod } g(x)) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x^{11}(\text{mod } g(x)) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & x^{10}(\text{mod } g(x)) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & x^9(\text{mod } g(x)) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & x^8(\text{mod } g(x)) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & x^7(\text{mod } g(x)) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x^6(\text{mod } g(x)) \end{bmatrix}$$

RS 纠错编码由于采用了 m 进制,所以它是多进制调制时的自然和方便的编码手段。因为 RS 码能够纠正 t 个 m 位二进制码,所以适合在衰落信道使用,以克服突发性差错。

3 Walsh 变换

3.1 普通的 Walsh 变换

Walsh 函数在通信中也称为 Walsh 码,它是美国数学家 Walsh 于 1923 年提出的一类完备的正交函数系,其最大的特点是每个函数仅取 +1、-1 两个值,比较适合用来表达和处理数字信息^[4],因而在信号处理、图像处理、通信及计算机等众多领域得到了广泛的应用。

Walsh 函数系一般可以分为 3 类,即 Walsh 序的 Walsh 函数系、Paley 序的 Walsh 函数系和 Hadamard 序的 Walsh 函数系。这 3 类函数的区别在于它们各个函数出现的编号不同。这 3 种序的本质是一样的,它们之间可以通过变换矩阵相互转换。在此仅给出 Walsh 序的 Walsh 函数。所谓 Walsh 函数系是指下列函数系:

$$w(k, t) = \prod_{j=0}^{m-1} \text{sgn}(\cos k_j 2^j \pi t); 0 \leq t < 1; k = 0, 1, 2, \cdots \tag{4}$$

式中,sgn 为符号函数,对于 $\text{sgn}[x]$,当 $x > 0$ 时,值为 +1,而当 $x < 0$ 时,值为 -1; k, j 取值 0 或 1 是由序数 k 的二进制码来决定,即:

$$k=\sum_{j=0}^{m-1}k_j2^j\tag{5}$$

Walsh 函数系的所有函数的周期都是 1,并且函

数的取值在单位区间[0,1)上均非零,因此称 Walsh 函数系为全局函数。由上述定义可以得出 Walsh 函数前 16 个 Walsh 函数的值:

$w(0,t)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$w(1,t)$	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
$w(2,t)$	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
$w(3,t)$	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
$w(4,t)$	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
$w(5,t)$	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1
$w(6,t)$	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
$w(7,t)$	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
$w(8,t)$	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1
$w(9,t)$	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
$w(10,t)$	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1
$w(11,t)$	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1
$w(12,t)$	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1
$w(13,t)$	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1
$w(14,t)$	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1
$w(15,t)$	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1

如果把其中的 1 取为 1, -1 取为 0,则可以得到如表 2 所示的一种按顺序排列的 Walsh 函数表。

表 2 Walsh 函数

Table 2 Walsh Functions

十进制	十六进制	Walsh 函数
	MSB LSB	MSB LSB
0	0000	1111 1111 1111 1111
1	0001	1111 1111 0000 0000
2	0010	1111 0000 0000 1111
3	0011	1111 0000 1111 0000
4	0100	1100 0011 1100 0011
5	0101	1100 0011 0011 1100
6	0110	1100 1100 0011 0011
7	0111	1100 1100 1100 1100
8	1000	1001 1001 1001 1001
9	1001	1001 1001 0110 0110
10	1010	1001 0110 0110 1001
11	1011	1001 0110 1001 0110
12	1100	1010 0101 1010 0101
13	1101	1010 0101 0101 1010
14	1110	1010 1010 0101 0101
15	1111	1010 1010 1010 1010

在 Walsh 变换时,将 m 个信息比特作为一个调制符号,选用一个 $M(=2^m)$ 个正交码中的一个进行变换,一个扩频序列传输 m 比特信息,提高了传输效率。当扩频增益相同时,Walsh 码变换系统带宽

只需传统直接序列扩频系统带宽的 $1/m$,特别适合带宽有严格限制的环境。

通过 Walsh 变换,增加了信号的数据位长度,使得信号的抗噪性得到了提高,而且由于 Walsh 的相关性,使得变换后的信号具有一定的容错能力。通过一个仿真,可以了解 Walsh 变换的作用。仿真采用 MSK 调制方式,一个 4 bit 的数据在信噪比为 8 dB 时,不能正确解码,加入 Walsh 变换后,在有一定的错码存在的情况下可以通过相关来得到正确的原码。假设原码为 1101,根据表 2,得到变换后的码为 1010010101011010。

首先建立一个无软扩频的模型,如图 1 所示,信噪比为 8 dB。

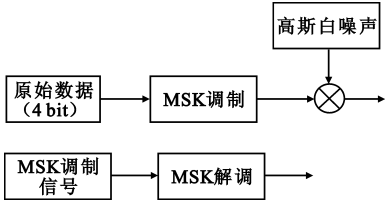


图 1 无软扩频模型

Fig. 1 No-soft-spectrum-spreading model

图 2 为无软扩频仿真结果,其中第一栏为原始数据,第二栏为调制后的信号,第三栏为解调后的数据。从图中可以看出,在信噪比为 8 dB 的情况下,调制后的数据已经较差,在解调后无法得到正确的原始数据。

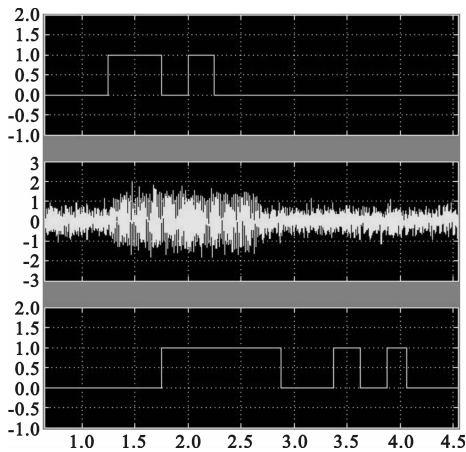


图 2 无扩频的仿真结果

Fig.2 Simulation result of no-soft-spectrum-spreading

再模拟工程应用来建立具有 Walsh 变换的仿真模型,信噪比依然为8 dB,16 个相关器为 Walsh 中的 16 个扩频码,如图 3 所示。

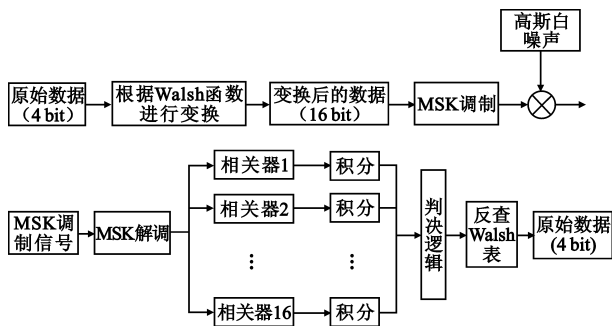


图 3 软扩频系统模型

Fig.3 Soft spectrum spreading system model

图 4 为软扩频仿真结果,其中第一栏为扩频后的数据,第二栏为扩频后数据的调制信号,第三栏为解调后的扩频数据。可以看出,解出来的码依然是有错误的,但这时还没有进行相关处理。

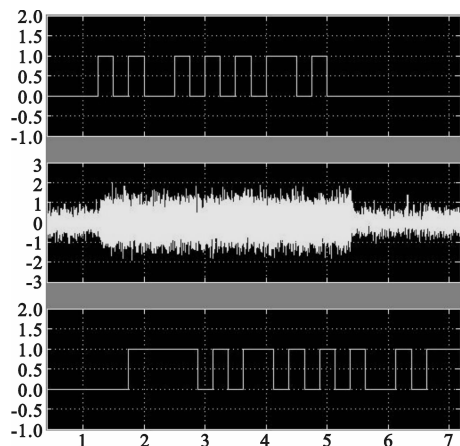


图 4 软扩频数据的仿真结果

Fig.4 Simulation result of soft spectrum spreading

将得到的解调数据与 16 个相关器进行相关和积分处理后,可以得到该数据与伪随机码 1010 0101 0101 1010 的相关性最高,但其中含有两个错码,误码率为 12.5%。图 5 显示了两位错码的位置(其中第一栏为解调数据,第二栏为原始数据,两根竖线标注的位置为错码位)。再通过反查 Walsh 表得到 1010 0101 0101 1010 对应的数为 1101,与原始数据是完全相同的。

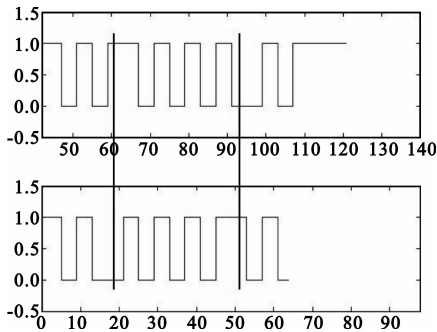


图 5 错码位

Fig.5 Faulty code bit

通过仿真可以看出,加入 Walsh 变换后信号的抗噪性明显增加了,根据公式

$$H = 10 \lg(N/k)$$

可以得出 Walsh 变换的扩频增益为 H dB。有了这 H dB 的增益后,信号的灵敏度可以得到很大的提高。

3.2 改善的 Walsh 变换

由于信号的传输是非同步传输,在这种情况下 Walsh 码的自相关函数和互相关函数均不理想,具有较大的旁瓣;而且, Walsh 码各码序列的功率谱分布彼此不均匀相同,不能独立承担扩频任务。这时需要构造一个相关特性较好的伪随机码(通常为 m 序列)来和 Walsh 码进行复合(模 2 加),得到复合码。复合码既保持了 Walsh 码的同步正交性,又大大改善了其相关函数的特性,减少了旁瓣,具有良好的非同步相关性。

伪随机码的相关性对扩频系统性能的影响非常大。要使系统性能保持稳定,选择的伪随机码互相关性应该较好,因为 m 序列的周期性自相关函数最为理想,所以选择 m 序列做为伪随机序列。 m 序列伪随机序列的发生器由 N 级移位寄存器作为主支路,用若干级模 2 加法和各级移位寄存器抽头组成线性反馈支路。输出的序列并非真正的随机序列,而是一个周期为 $2^N - 1$ 位的重复序列,其中 N 表示生成这个序列的移位寄存器的长度。

在相同噪声和相同扩频增益的情况下,对使用了复合码的 Walsh 变换和直接扩频的误码比特率进行仿真,结果如图 6 所示,可以看出在信号衰减较小时使用了复合码的 Walsh 变换系统和直接扩频系统的误码率相差不大,但在信号衰减较大时,使用了复合码的 Walsh 变换系统比直接扩频系统有更低的误码率。

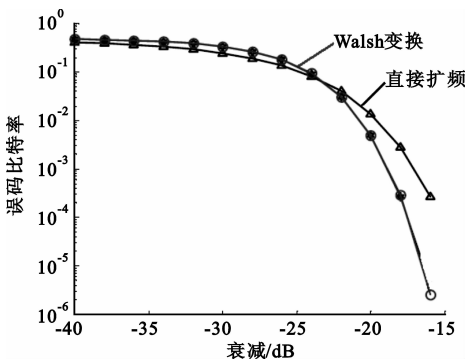


图 6 误码比特率比较
Fig.6 BER comparison

4 工程应用

在实际工程中,信号存在着各种干扰,而且在现代战争中,信号的保密性也是非常重要的。这种结合了 RS 纠错编码和 Walsh 变换的软扩频技术在实际工程中有着非常强的适用性。

在工程中信号首先经过 RS 纠错编码和 Walsh 变换,再进行 MSK 调制后送给信道发射;接收时先进行 MSK 解调,再进行 Walsh 反变换和 RS 纠检错并解码,最终得到原信号。系统框图如图 7 所示。

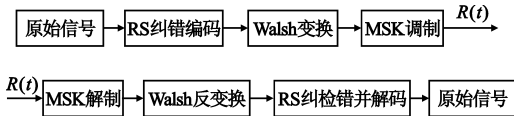


图 7 系统框图
Fig.7 Block diagram of the system

在经过 RS 纠错编码后,信号的保密性得到了提高,根据 RS 的特性,可以在解码时对一定的错码进行检测和纠正。而 Walsh 变换更是提高了信号的抗干扰能力,使得信号更加可靠,这在实际工程中是非常有用的。

与普通的软扩频技术相比,这种方法不仅具有一般扩频的保密性和抗干扰能力,而且有一定的纠错能力。

5 结束语

本文通过对 RS 纠错编码和复合 Walsh 变换产生方法的研究,深入分析了两种方法在工程应用中的优势,并和普通的直接扩频进行了比较,发现信号通过 RS 纠错编码后增加了数据位的长度并可以对信号进行纠检错,而 Walsh 变换将每一位的比特长度进行了扩展,并通过与伪随机码复合后得到复合码,信号在传输过程中经常被各种噪声干扰,信号之间也存在着叠加,将这两种技术结合而成的软扩频在正交性和纠错方面都有良好的表现,对信号处理和分析有着很大的帮助,在实际工程中有很强的应用性。软扩频技术是近年来比较新的一种扩频技术,其中可以延伸和扩展的地方很多,相信通过对编码方法的研究,可以得到更好的软扩频方法。

参考文献:

[1] 曾孝平,王宇峰,刘劲. 软扩频技术及其编码与性能分析[J]. 重庆邮电学院学报,2001,22(4):22-25.
ZENG Xiao-ping, WANG Yu-feng, LIU Jing. Principle of Tamed Spread Spectrum System and the Coding and Performance Analysis[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2001,22(4):22-25. (in Chinese)

[2] 刘剑锋,霍效新. 一种基于 RS 码序列的软扩频系统及其 Simulink 仿真[J]. 信息与电子工程,2007,5(6):441-443.
LIU Jian-feng, HUO Xiao-xin. A Novel Tamed Spread Spectrum System Based on RS Code and Its Simulation by Simulink[J]. Information and Electronic Engineering, 2007, 5(6):441-443. (in Chinese)

[3] 童莹,张健. 基于 GPU 的快速二维沃尔什变换研究[J]. 微电子学与计算机, 2011,28(1):46-49.
TONG Ying, ZHANG Jian. Research of Fast 2-D Walsh Transformation Based on GPU[J]. Microel Ectronics & Computer, 2011,28(1):46-49. (in Chinese)

[4] 李斯伟,陈惠萍. 基于宽带信号的 Walsh 码扩频通信[J]. 通信技术, 2000,109(4):75-79.
LI Si-wei, CHEN Hui-ping. Walsh Code SS Communication Based on Broadband Signal[J]. Communications Technology, 2000,109(4):75-79. (in Chinese)

作者简介:

唐大宇(1978—),男,四川成都人,2001 年获学士学位,现为工程师,主要研究方向为二次雷达数字信号处理。
TANG Da-yu was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1978. He received the B.S. degree in 2001. He is now an engineer. His research concerns the digital signal processing for the secondary radar systems.
Email: iceshadowcn@163.com