

doi: 10.7690/bgzd.2013.10.011

一种基于扩频通信的多机器人关键技术

朱运航, 邓知辉

(湖南信息职业技术学院信息工程系, 长沙 410200)

摘要: 利用通信来改善多机器人系统协调控制的性能成为近年来的研究热点, 而随着多机器人技术和无线通信的快速发展, 基于扩频通信技术的多机器人通信系统成为两种技术结合的产物。将码分多址技术应用于多机器人通信平台中, 通过分析 Walsh 码、 m 序列的相关特性, 引入改进的 m -Walsh 序列, 得到相关特性最佳的直扩序列, 在此基础上提出了一种改进的 RAKE 接收方案。通过 Matlab/Simulink 仿真分析, 该方案较好地满足了多机器人系统在通信的实时性、可靠性、保密性和抗干扰性等方面的要求, 对多机器人通信机制的研究具有重要意义。

关键词: 多机器人; 技术; 扩频; Walsh 码

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Key Technology of Multi-Robotic Based on Spread Spectrum Communication

Zhu Yunhang, Deng Zhihui

(Department of Information Engineering, Hunan College of Information, Changsha 410200, China)

Abstract: It has become a hot research topic that to improve the coordination performance of multi-robotic system by communication. With rapid development of wireless communication and robot technologies, multi-robotic system based on spread-spectrum technology has become product of combining two technologies. Code division multiple access (CDMA) technology is applied in multi-robotic communication system here. According to the modified m -Walsh sequence got by the way of analyzing the relation characteristic of Walsh-code and m -sequence, the best direct sequence spread spectrum (DSSS) PN code and the improved RAKE receiver scheme are proposed, which satisfied the requirements of real-time performance, reliability, confidentiality and anti-interference performance in multi-robotic communication system, and have great significance for the research of multi-robotic communication system.

Key words: multi-robotic; technology; spread spectrum; Walsh code

0 引言

为保证多机器人之间能有效交流和协作, 通信便成为多机器人系统研究中不可或缺的内容^[1]。鉴于机器人的工作环境及无线通信技术的不断成熟, 无线通信成为机器人和外部通信的理想选择之一。

笔者设计了一种分布式多机器人共享单一信道的通信机制。由于扩频技术抗干扰能力强、隐蔽性好、具有多址能力、可抗频率选择性衰落^[2], 文中采用多进制直扩技术, 减少网内干扰、改善系统中存在的远近效应, 使得采用窄的带宽也能获得较大的扩频增益。从频谱利用率的角度来看, 意味着以设备的复杂性作为代价来减少带宽, 以便获得同样的系统总增益; 同时考虑到减小发射和接收端体积、重量, 提高频谱利用率、系统的稳定性和可靠性, 选用了时分双工的工作模式; 为了保证一定的抗误码性能, 并使用现场可编程门阵列来完成信号的解调, 采用四相相移键控调制、非相干解调方式。笔者主要针对多机器人通信系统上行部分的发送与接收模块系统的数字信号处理部分, 在具体实现过程

中的关键技术进行了探讨。

1 直扩序列码

扩频 (spread spectrum, SS) 系统是用一个高速率、大带宽的数字编码伪随机序列去直接调制载波信号, 从而使射频信号频谱变宽。在直接序列扩频 (direct sequence spread spectrum, DSSS) 码分多址 (code division multiple access, CDMA) 系统中, 最关键的技术之一就是扩频序列的选择和构造, 其码元长度、相关特性、随机性决定着系统的性能优劣, 如: 系统的强抗干扰性能、抵制多径效应的抗衰落、低截获率、高精度定时定位、信息数据隐藏和保密等均与所采用的扩频序列密切相关。笔者运用 m 序列对 Walsh 码进行加扰, 改善其相关特性, 并进行理论分析与仿真, 试获得最佳的直扩序列。

1.1 改进的 m -Walsh 序列

Walsh 码具有良好的同步正交性, 在 CDMA 移动通信中占有非常重要的地位。通过对 Walsh 码的理论分析和计算可以看出, 在完全步状态 ($\tau=0$) 下

收稿日期: 2013-05-10; 修回日期: 2013-06-03

基金项目: 湖南省教育厅资助科研项目, 基于网络控制的家政服务机器人关键技术研究与应用 (12C1175)

作者简介: 朱运航 (1968—), 女, 湖南人, 硕士, 副教授, 从事集成电路设计与信号处理研究。

自相关和互相关函数值都为 1，具有理想的同步正交性能，但在不同步状态 ($\tau \neq 0$) 下，Walsh 函数 ($Wal_w(i,t)$) 的自相关性不好，且互相关为 0；其自相关和互相关的旁瓣值 $|R(\tau)|_{\max}$ 也都比较大，某些处的峰值过高。较大的自相关旁瓣值很不利于 Walsh 码的同步，同样 Walsh 函数的相关旁瓣值是形成用户信号间多址干扰的最根本原因，降低了系统的多址性能，不利于在码分系统中的应用。在 CDMA 系统应用中，为了提高同步精度，改善其自相关特性，Walsh 码不适用于直接作为 CDMA 系统的 SS 码，需要对其进行改进后再加以应用。

m 序列是最常见和最常用的一种伪随机序列，规律性强，性能优良，在 SS 通信中最早得到广泛应用。在采用 Walsh 码扩频的通信系统中，多采用自相关函数旁瓣值小的 m 序列对 Walsh 码进行加扰（就是一个调制的过程），来改善其自相关特性，提高系统的抗多径干扰能力及保密性能^[3]。由理论分析和计算可知， m 序列的自相关特性最理想，其主峰与旁瓣之比等于码长 $k(1 \leq k \leq n-1)$ ，即： $\frac{R_i(0)}{|R_i(k)|} =$

N (为了方便，用 R 函数表示)； $k \neq 0$ 。其他相关函数旁瓣特性明显不如周期性自相关特性。选取一个自相关函数旁瓣值小的伪随机 $m(t)$ ，乘以 Walsh 码（相当于一个调制的过程），从而得到一组新码字 $b_i(t) = W_i(t)m(t) (i=0,1,2,3,\dots,N-1)$ ，即改进的 Walsh 码。这样充分体现 Walsh 码完全正交的优势，又减小了旁瓣值的影响。加扰后的 Walsh 码互相关函数为： $R_y^b(\tau) = \int_0^T b_i(t)b_j(t-\tau)dt$ 。当同步 ($\tau=0$) 时，若伪随机序列与其周期相同，则有：

$$R_y^b(\tau) = \int_0^T b_i(t)b_j(t)dt = \int_0^T W_i(t)W_j(t)m^2(t)dt = \int_0^T W_i(t)W_j(t)dt = \begin{cases} T, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

当不同步 ($\tau \neq 0$) 时，则有：

$$R_y^b(\tau) = \int_0^T W_i(t)W_j(t-\tau)m(t-\tau)dt$$

由此可见，改进的 Walsh 码在同步状态下完全满足正交条件，具有理想的正交性能，而且自相关和互相关特性都比原来的 Walsh 码性能好^[4]。

1.2 改善 Walsh 码特性分析

在 CDMA 系统中，解扩序列与发送信号的副本不同步时，就导致多径干扰，其干扰大小取决于扩频序列的自相关函数旁瓣；而多址干扰的大小取决于 SS 序列间的互相关旁瓣。所以一般情况下通过

对自相关及互相关主瓣及旁瓣的大小来分析码特性。笔者将互相关各瓣和（一个周期内互相关的旁瓣相加）与自相关各瓣和（一个周期内的自相关的主瓣与旁瓣的和）进行比较，来分析经上述章节中改善后的 Walsh 码特性。同时，在和的统计过程中，分 3 种情况进行分析：代数和 $\sum_{j=1}^N R_k(j)$ 与 $\sum_{j=1}^N R_{k,l}(j)$ 、绝对值和 $\sum_{j=1}^N |R_k(j)|$ 与 $\sum_{j=1}^N |R_{k,l}(j)|$ 、平方和 $\sum_{j=1}^N R_k(j)^2$ 和 $\sum_{j=1}^N R_{k,l}(j)^2$ ，以 128 位改进 Walsh 码为例，通过 Matlab/Simlunk 仿真分析比较，哪种情况更适合于判断自相关各瓣和值与所有互相关各瓣和值大小。

1) 3 种和值统计方法比较。

图 1 为一个周期内 128 个码片的代数和数据统计图；图 2 为相应的绝对值和数据统计图；图 3 为平方和统计图。横坐标为码型编号 (1~128)，纵坐标分别为代数和值、绝对值和值和平方和值。其中直线表示 $\sum_{j=1}^{128} R_k(j)$ ，虚线表示 $\left(\sum_{j=1}^{128} R_{k,l}(j)\right)_{\max}$ 。

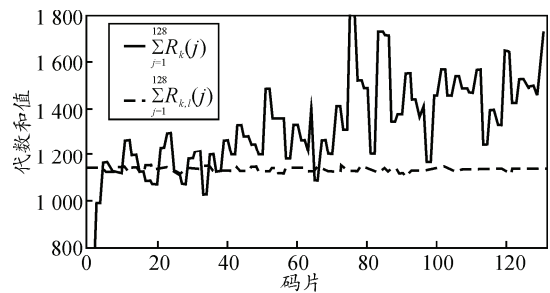


图 1 代数和统计特性

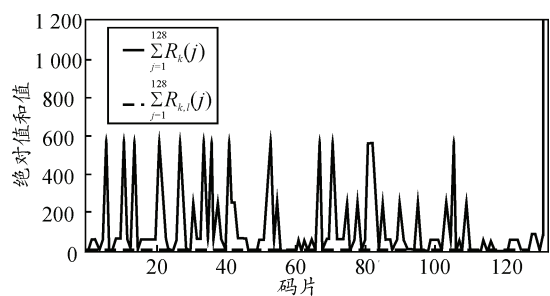


图 2 绝对值和统计特性

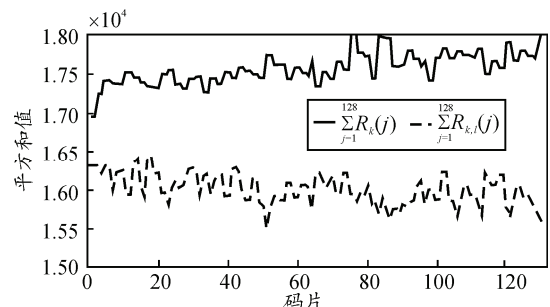


图 3 平方和统计特性

从图中可以看出：代数和统计情况下，自相关的各瓣代数和不一定大于互相关各瓣代数和的最大值；绝对值和统计情况下，自相关的各瓣绝对值和大于或等于互相关各瓣绝对值和的最大值；平方和统计情况下，自相关的各瓣平方和大于互相关各瓣平方和的最大值，并有较大裕量。在实际多进制 DSSS 系统应用中，匹配滤波器接收机通过检测器计算并选择最大相关度量的序列。如果自相关的相关值小于或等于某些互相关的相关值，会形成误判；因此，图 1、图 2、图 3 统计特性说明：只有相关特性的平方和可以用于匹配滤波器相关接收，即使是有噪声的情况下，发生误判的概率也相当小。

2) 不同码长对相关特性的影响。

由上述讨论分析可知：取一个周期 T 内相关特性的平方和才是切实可行的统计方法，因此再运用平方和统计来分析改善后的 Walsh 码不同码长时的特性^[5]。一个周期 T 内 64 个码片的平方和数据统计图如图 4 所示。

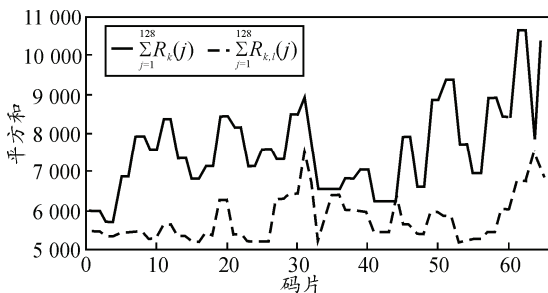


图 4 码长为 64 的相关特性平方和统计

由图 4 可知，自相关各瓣平方和与互相关各瓣平方和的最大值有多处比较接近。与图 3 进行比较发现，码长为 128 的扩频码的码特性比码长为 64 的扩频码性能优越，说明增加码长可以改善 SS 码的相关特性，所以，应采用 128 位的改进 m -Walsh 码。

1.3 小结

在 CDMA 通信方式中，多址干扰是最主要的干扰形式，通过构造性能理想的扩频码，改善址码的互相关特性，并适当增加码长，可以较好地克服多址干扰，但是理想的互相关系数(处处为 0)的地址码是不存在的，所以多址干扰在 CDMA 传输方式中总是客观存在的^[6]。

2 Rake 接收方案

在 CDMA 通信系统中，影响最大的是多址干扰，其次就是多径干扰。机器人一般在室内工作，

各种折射、反射现象非常普遍，将产生严重的多径和时延现象，这种多径衰落的存在使得机器人移动通信质量受到影响，运用分集接收技术可以在不增加发射机功率或信号带宽的情况下有效地克服多径衰落，提高系统的可靠性。而 RAKE 接收机是 CDMA 系统中实现分集接收的核心技术^[7]。

RAKE 接收机对于室内传播的信号，当传播时延超过了一个码片的长度，多径信号就可以被看作是非相关，这样可将不同路径接收机的输出合成一个输出，以提供优于单路相关器的信号检测，再在此基础上解调和判决。但一般的 RAKE 接收机都是在基带上实现的，并没有考虑接收到的多径信号载波间的相位影响，因此不能够消除相位差的影响，从而影响定位精度^[8]。一般情况下，RAKE 接收机的性能有 2 个影响因素：多径分量的选择方式、多径的合并方式。笔者在上述改进型 Walsh 码基础上提出一种改善型 RAKE 接收方案，并运用 Matlab/Simulink 仿真软件验证瑞利衰落信道下的系统误码性能。

2.1 Rake 接收匹配滤波法

匹配滤波器是实现 RAKE 接收的理想方法。由于移动通信传播中多径引起了接收信号时延功率谱的扩散，RAKE 接收设法将被扩散的信号能量充分利用起来。根据宽带扩频信号的相关理论^[9]，设计适当扩频比的 SS 序列和相应的 RAKE 接收信号处理方式，充分利用不同路径信号，经过延迟和相位校正、幅度加权进行多径分集，将被扩散的信号能量分离、处理、合并，并加以有效利用，变矢量和为代数和，进一步降低多径干扰对系统性能的影响，采用匹配滤波器法分离多径信号能量，能最大化接收信号的信噪比，并在噪声中检测出期望信号。直扩相干解调下 RAKE 接收原理如图 5 所示，其中接收到的多径信号为 $x(t) = \sum_{q=1}^Q u_q s_i [t - (q-1)T_c]$ ，分离的

射线数： $Q = \frac{\tau_{max}}{T_c}$ ，系统最大时延为 τ_{max} 。

由图 5 知，RAKE 接收机收到输入信号，由相关电路和本地伪码发生器单极性相加，对多径信道特性进行测量，抽样和时延校正后得到有效的信号处理数据，接着本地伪码信号与该数据进行相关运算，获得不同时延信号强度的分布规律，测量出不同时延信号的载波频率和相位；再对多径分量乘上信道加权系数，获得相关值，相干解调后得到其基

带扩频信号，再进行相加，与本地 SS 码相关数字化解调，送入最大值选择比较电路比较判决后即可获得信息码元。该多径分集为最大比值合并接收，笔者对相关结果进行采样，即在一个周期 T 内采样 128 次，将采样结果相加，其和作为判决的依据。

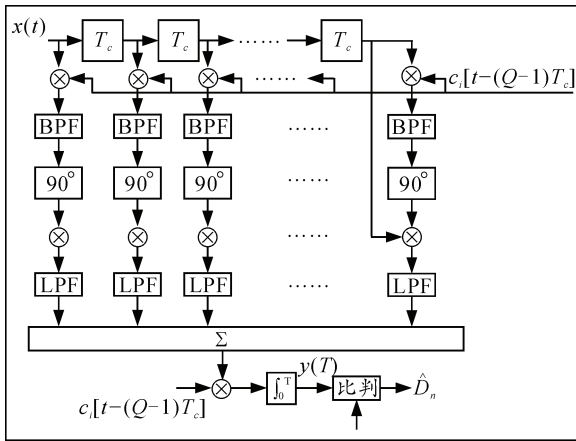


图 5 RAKE 接收匹配滤波法原理

2.2 多径瑞利衰落信道仿真

在多机器人的移动通信系统中，复杂信道产生的多径和时延使接收信号的幅度和相位都将发生改变，即所谓的多径瑞利衰落。为了验证基于 RAKE 接收匹配滤波器法的性能，建立了系统仿真模型^[10]，以 RAKE 接收机中信道单元对时延和相位的精确估计为前提，引入多径干扰和高斯噪声。同时，分别采用逐码片采样法和周期采样法进行仿真得到误比特率 (BER) 与信噪比 (SNR) 的关系曲线，如图 6。

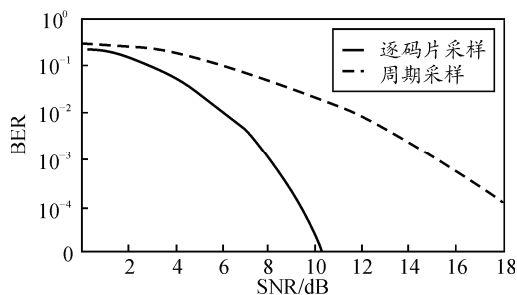


图 6 多径瑞利衰落信道下误比特率与信噪比

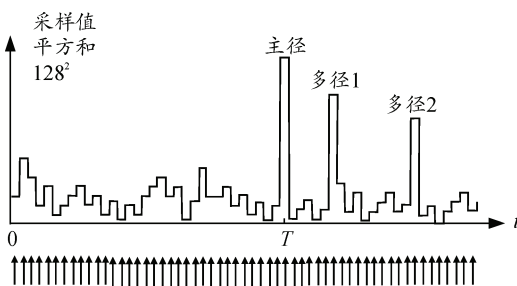


图 7 逐码片采样法在多径瑞利衰落情况下的应用

从图 6 可得：在多径瑞利衰落的信道情况下，逐码片采样法的误码性能比周期采样法要好得多。前者在将周期内所有旁瓣值相加的过程中，把多径能量充分收集起来，变矢量和为代数和，有效减少了多径衰落的影响，降低了误比特率，如图 7 所示。

3 结论

笔者主要对多机器人通信系统上行部分的发送与接收模块系统数字信号处理部分的具体实现中的关键技术作了理论分析与仿真，结果表明：改进的 m -Walsh 序列具有良好的相关性，相关特性各瓣的平方和可以应用于匹配滤波器相关接收，还可以增加 SS 码的长度来改善码特性。本 SS 系统采用的 SS 码为 m 序列改善的 128 位 Walsh 码序列，并采用统计平方和的方案对接收的信息序列处理，继而同步、解扩、判决。同时，在码特性基础上，提出的改进型 RAKE 接收方案，在多径瑞利衰落信道下进行仿真分析后发现，逐码片采样法的误码性能远优于周期采样法，因此非常适合多机器人在多径干扰严重的室内通信、移动通信系统中。

参考文献：

- [1] 谭民, 王硕, 曹志强. 多机器人系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 23-45.
- [2] 何世彪, 谭晓衡. 扩频技术及其实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 41-60.
- [3] 曾兴雯, 刘乃安, 等. 扩展频谱通信及其多址技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 12-105.
- [4] 续大我. 多进制伪码正交调制系统多址性能的改善[J]. 北京: 北京邮电大学学报, 1996(2): 88-91.
- [5] 乔俊福, 温泽源. 模糊控制算法在移动机器人中的应用[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 79-82.
- [6] Xue Caijiao. Anti-interference Performance of Multipath Direct Sequence Spread Spectrum Wireless Communication System[C]. 2010 International Conference on E-Health Networking, Digital Ecosystems and Technologies. IEEE, 2010(1): 461-464.
- [7] Wang Yuan, Xu Huang, Jia Peifa. A Survey of Information Fusion in Multi-robot Systems[J]. Microelectronics and Computer, 2007, 24(12): 150-156.
- [8] Zhu Yun-hang, Zhang Ping-hua, Deng Ming-yuan. Simulation Research on Direct Sequence Spread Spectrum Communication System over Rayleigh Fading Channels[C]. Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference, 2011(8): 4317-4321.
- [9] 傅鹏, 张代远. 基于 System View 的 RAKE 接收机仿真[J]. 计算机技术与发展, 2013(4): 1-6.
- [10] 陈国平, 张百珂, 曾浩. 室内主动源 TR 定位技术[J]. 数字通信, 2013(1): 34-39.