

Design of Space Diversity Receiver

LIU Haoran¹, MU Daosheng², SU Wei³, WANG Song¹

1. Company of Postgraduate Management, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing, China

2. Department of Information Equipment, Institute of Command and Technology of Equipment, Beijing, China

3. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an, China

e-mail: relative007@tom.com, mudaosheng19041@sina.com, suweixcc@hotmail.com, wangsong1982108@163.com

Abstract: This paper discussed the theory of diversity receive aiming at the channel fading, raised a design project of diversity receiver, analyzed the design of key module in the receiver in detail, actualized the design on FPGA.

Keywords: diversity receiver; phase regulate; SNR estimation; FPGA

空间分集接收机的设计

刘浩然¹, 穆道生², 苏威³, 王松¹

1. 装备指挥技术学院 研究生管理大队, 北京, 中国, 101416

2. 装备指挥技术学院 信息装备系, 北京, 中国, 101416

3. 西安卫星测控中心, 西安, 中国, 710043

e-mail: relative007@tom.com, mudaosheng19041@sina.com, suweixcc@hotmail.com, wangsong1982108@163.com

【摘要】 本文针对无线通信中的信道衰落特征讨论了分集接收的原理, 提出了基于最大比合并的分集接收机设计方案, 详细分析了接收机中关键模块的设计, 并在 FPGA 平台上对该设计方案进行了实现。

【关键词】 分集接收机; 相位调整; 信噪比估计; FPGA

无线通信信道的最突出特点是信号的多径传播, 电波通过的各个路径距离不同, 因而各条路径来的反射波的到达时间不同、相位也不同。不同相位的多个信号在接收端迭加, 有时同相迭加而加强, 有时反相迭加而减弱。这样, 接收端接收信号的幅度将急剧变化, 即产生了衰落。信道衰落是限制通信系统性能发挥的巨大瓶颈。分集接收技术被证明是有效的抗衰落手段。在各种分集形式中, 空间分集技术有效的利用空间维资源, 在不占用额外的时间和频率资源的情况下, 有效的发挥其抗衰落的作用。本文在空间分集接收技术的基础上, 分析讨论实现分集接收的关键技术, 并在FPGA平台上进行了设计和实现。

1 空间分集接收技术简述

空间分集接收的思想即是在通信系统的接收端使用多天线, 接收经过不同路径传输到的信号, 当天线间距离满足一定要求时, 可以认为接收到的多路信号所经历的衰落相互独立, 利用相应的信号处理办法, 将这些信号进行合并, 以获取满足系统要求的信号,

从而达到抗信道衰落的目的。常用的合并方式主要有以下三种: 选择式合并 (Selecting Combining)、最大比合并 (Maximal Ratio Combining) 和等增益合并 (Equal Gain Combining)。

图1是对三种分集合并方式在不同天线数目下分集增益 (即多天线合并输出信号相对于单天线接收信号的信噪比提升) 的仿真结果。

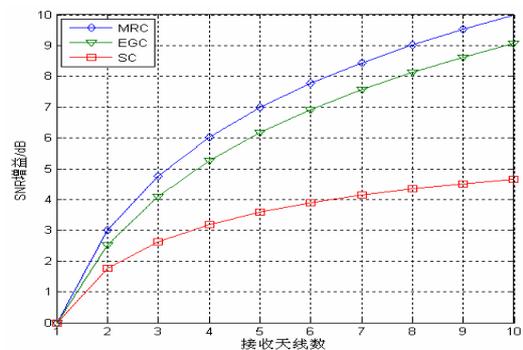


Figure 1. Comparison of gain between SC, EGC and MRC

图 1. 三种分集接收方式的增益对比

由图可以看出，选择式合并性能最差，但其系统结构简单，易于设计实现；等增益合并性能和实现复杂度之间取得折中，但其适用于各路信号信噪比接近的场合；而最大比合并性能最优，其设计实现也较为复杂。

2 系统方案及关键模块设计

2.1 系统设计方案

最大比合并的最终输出的信号是所有天线接收信号的组合相加，而且每路信号在相加之前进行一定得加权，加权系数正比于各路信号自身的信噪比。最大比合并最终输出一个信噪比为各支路信噪比之和的信号，因此即使每个支路的信噪比都很低，仍然可以获得一个可以接受的信噪比。

使用了两根接收天线的空间分集接收机简单的系统结构如下图所示。

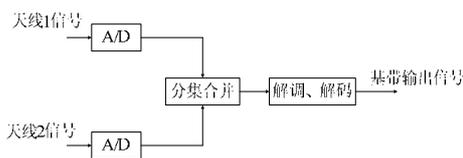


Figure 2. Framework of diversity receiver
图 2. 分集接收机结构

接收机使用两根天线对信号实现分集接收，采用最大比合并方式实现两路信号的合并。如上图所示，接收机的主要包括两部分：射频单元和基带单元。射频单元主要完成两路信号的接收、滤波、放大等功能，而基带单元完成两路信号的最大比合并，并对合并输出后的信号进行下变频、解调解码等处理。而作为分集接收机的核心部分，最大比分集合并模块的结构如下图所示。

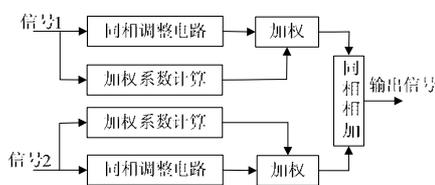


Figure 3. Framework of MRC module
图 3. 最大比合并模块结构

2.2 关键模块的设计

由图3可知，分集合并部分中涉及两个关键模块，

分别是两路信号的相位调整模块和各个信号的加权系数计算模块。

(1) 相位调整电路的设计

实现两接收天线的分集接收，必须要求两路信号在进行合并满足相位相同的要求，否则将造成传输错误蔓延，极大地影响分集接收系统的性能。本系统中使用结构如下的基于双环锁相的相位调整电路。

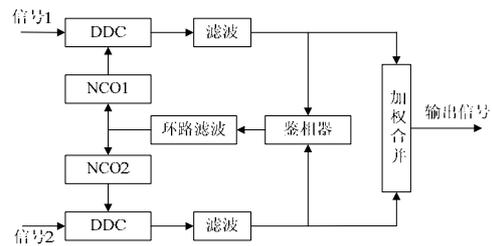


Figure 4 Framework of phase regulate circuit
图 4. 相位调整电路结构

该结构使用两个锁相环来实现两路信号的同相调整。如图所示，两个锁相环分别使用两个压控性能对称的 NCO，各产生一组信号作为正交数字下变频的本地信号，将其分别表示为：

$$\begin{cases} x_1(n) = \sin(\omega_1 n T_s + \theta_0) \\ x_1'(n) = \cos(\omega_1 n T_s + \theta_0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_2(n) = \sin(\omega_2 n T_s + \theta_0') \\ x_2'(n) = \cos(\omega_2 n T_s + \theta_0') \end{cases} \quad (2)$$

式中 T_s 表示码元周期。两组信号参数应满足： $\omega_1 = \omega_2$ ， $\theta_0 = -\theta_0'$ 。

频率为 ω 、相位分别为 θ_1 和 θ_2 的两接收信号经正交数字下变频后，得到各自的 I 路和 Q 路信息，分别表示为：

信号 1:

$$\begin{cases} I_1(n) = As(n) \cos(\omega_0 n T_s + \phi_1) \\ Q_1(n) = As(n) \sin(\omega_0 n T_s + \phi_1) \end{cases} \quad (3)$$

信号 2:

$$\begin{cases} I_2(n) = Bs(n) \cos(\omega_0 n T_s + \phi_2) \\ Q_2(n) = Bs(n) \sin(\omega_0 n T_s + \phi_2) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\omega_0 = \omega_1 = \omega_2$ ， $\phi_1 = \theta_1 - \theta_0$ ， $\phi_2 = \theta_2 - \theta_0'$ 。

为满足结构如鉴相器输出必须是奇函数（否则无法分辨相位的超前与落后）的要求，所以选择信号 1 的 Q 路信号和信号 2 的 I 路信号作为鉴相器的输入。

鉴相后的输出为:

$$y(n) = D \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (5)$$

其中幅度 D 在锁相环路中为一个常数, 而相位差 $\phi_1 - \phi_2$ 可表示为:

$$\phi_1 - \phi_2 = (\theta_1 - \theta_2) - (\theta_0 - \theta'_0) \quad (6)$$

由于两个 NCO 压控性能对称, 即 $\theta_0 = -\theta'_0$, 可知 $\phi_1 - \phi_2 = (\theta_1 - \theta_2) - 2\theta_0$, 因此 θ_0 即可作为补偿相位, 通过调整逐渐使得两路信号满足系统的同相要求。

(2) 权值系数计算模块

由前文可知, 最大比合并的实现要求对两接收天线获得的信号按照各自的信噪比进行加权处理, 因此在两路信号进行合并前必须对其进行信噪比估计, 以获得准确的加权系数, 从而实现最优的性能。

信号方差比算法(SVR)是一种在多径信道下较为精确的信噪比估计算法, 其运算过程不依赖辅助数据, 不增加系统额外的开销。关于算法的详细流程请参考文献^[4]。应用了 SVR 信噪比估计算法的加权系数计算电路结构如下图所示。

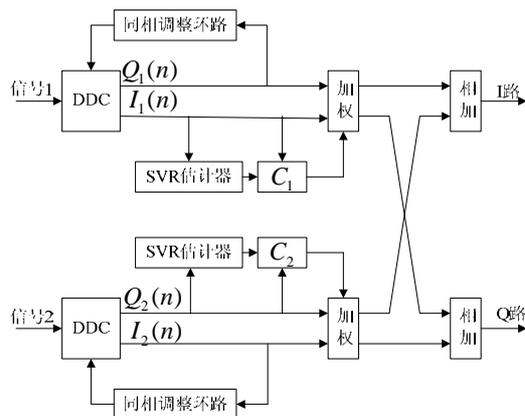


Figure 5. Framework of coefficient calculate circuit
图 5. 权值系数计算电路结构

电路中, $I_1(n)$ 、 $Q_1(n)$ 和 $I_2(n)$ 、 $Q_2(n)$ 分别为经由相位调整电路后信号 1 和信号 2 的 I 路和 Q 路信号, C_1 、 C_2 分别为对应于两路信号信噪比的加权系数。

由文献^[3]可知, 对 QPSK 调制的信号来讲, 其信噪比满足下式:

$$SNR = SNR_{I/Q} \quad (7)$$

即整个复信号的信噪比与实部或虚部信号的信噪比相同, 于是只需对实部或虚部信号进行处理估计出

的信噪比即可(而实部或者虚部的处理与一个 BPSK 信号的处理相同)。因此, 在本系统的中, 分别取第一个信号的 I 路信息和第二个信号的 Q 路信息来应用 SVR 算法进行信噪比估计。

最大比合并器要求按照各路信号的的信噪比对其进行加权, 为保证合并器的最终输出为一恒定的电平, 加权系数 C_1 、 C_2 应满足下式的要求:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = 1 \\ C_1 / C_2 = SNR_1 / SNR_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 SNR_1 、 SNR_2 分别为信噪比估计器对两路接收信号进行估计的输出值。由上式得适当的加权系数分别为:

$$\begin{cases} C_1 = SNR_1 / (SNR_1 + SNR_2) \\ C_2 = SNR_2 / (SNR_1 + SNR_2) \end{cases} \quad (9)$$

3 硬件设计

基于前文的分析和设计, 在 FPGA 平台上对分集接收机进行了设计和实现, 下面给出部分设计实现的结果。

图 6 至图 8 分别为分集接收机中鉴相器与环路滤波器、NCO 和 AGC 电路的设计图。本方案经 FPGA 平台设计仿真, 满足实际应用的需求, 取得较好的系统性能。

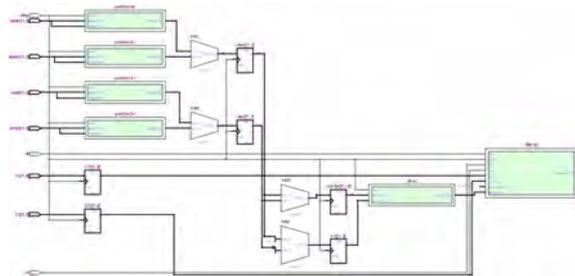


Figure 6. Circuit of phase identifier and loop filter
图 6. 鉴相器和环路滤波器的设计电路

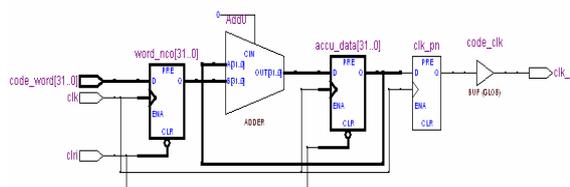


Figure 7. Circuit of NCO
图 7. NCO 设计电路

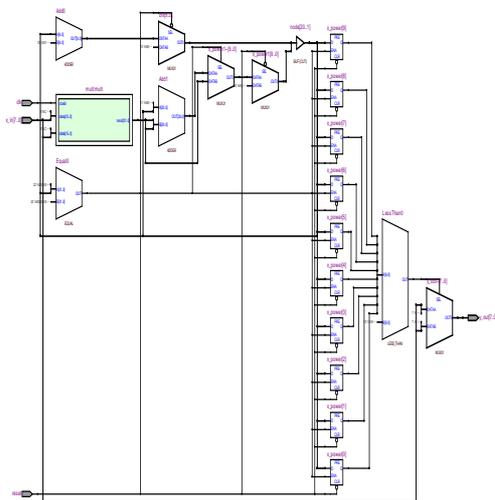


Figure 8. Circuit of AGC
图8. AGC的设计电路

4 结束语

本文在研究分集接收技术原理的基础上，分析设计了基于最大比合并的分集接收机，对关键技术和模块进行了分析和讨论，最终给出了基于FPGA平台的设计结果，经实际测试取得了较好的性能。

致谢

在论文的撰写过程中，穆道生教授对文中方案的设计做了全程指导并提出了建设性的意见，苏威在锁相环技术上做了深入的指导，王松为本文的行文、修改、校正付出了很多汗水。最后感谢父母多年来对自己的贴心呵护和默默付出。

References (参考文献)

- [1] Simon Haykin, Michael Moher. Modern Wireless Communication. Publishing House of Electronics Industry.2006:257_270. (美)Simon Haykin, Michael Moher著,郑宝玉译.现代无线通信.电子工业出版社.2006:257-270.
- [2] Chen Zhu. Research on Digital Diverse Receiver. Chongqing University. April 2006:17-19. 陈铸.数字分机接收机的研究[D].重庆大学.2006年4月:17-19.
- [3] Xu Hua, Fan Long-fei, Zheng Hui. A precise SNR estimation algorithm for QPSK signal. JOURNAL OF CHINA INSTITUTE OF COMMUNICATIONS. February 2004:55-60. 许华, 樊龙飞, 郑辉. 一种精确的QPSK信号信噪比估计算法[J]. 通信学报.2004年2月:55-60.
- [4] Yan Jun. Research and Development of Diverse Combining Technology in Train-ground communication system. University of Electronic Science Technology. April 2007:29_30. 严峻.车地通信中分集合并技术的研究与实现.电子科技大学.2007年4月:29-30.