



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105530053 B

(45)授权公告日 2019.08.02

(21)申请号 201410529162.4

审查员 张艳青

(22)申请日 2014.09.30

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105530053 A

(43)申请公布日 2016.04.27

(73)专利权人 重庆长安汽车股份有限公司

地址 400023 重庆市江北区建新东路260号

(72)发明人 何举刚 龙兴明 周霞 徐涛

王靖

(74)专利代理机构 重庆华科专利事务所 50123

代理人 康海燕

(51)Int.Cl.

H04B 10/60(2013.01)

H04B 10/116(2013.01)

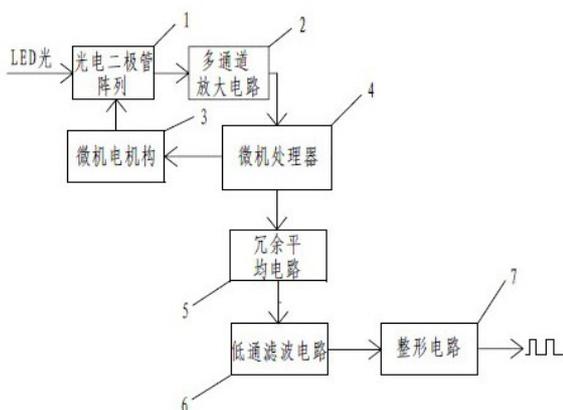
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种用于LED车灯光通信的自适应接收装置及方法

(57)摘要

本发明涉及车联网中的可见光通信技术,提供了一种用于LED车灯光通信的自适应接收装置,其包括光电转换模块和与该光电转换模块连接的微机处理器,所述光电转换电路包括接收光信号的光电二极管阵列和多通道放大电路,所述光电二极管阵列的输出端经多通道放大电路与微机处理器连接,该光电二极管阵列安装在一微机电机构上,所述微机处理器控制连接微机电机构。本发明还提供了一种用于LED车灯光通信的自适应接收方法,其采用光电二极管阵列进行光信号的接收和转换,并采用扰动观察法计算最优接收角度,对光信号发射源实现跟踪。本方案解决了现有技术对光信号接收的可靠性和稳定性问题。



1. 一种用于LED车灯光通信的自适应接收装置,包括光电转换模块和与该光电转换模块连接的微机处理器,其特征在于:所述光电转换模块包括接收光信号的光电二极管阵列和多通道放大电路,所述光电二极管阵列的输出端经多通道放大电路与微机处理器连接,该光电二极管阵列安装在一微机电机构上,所述微机处理器控制连接微机电机构;

采用光电二极管阵列接收LED车灯发射出来的光信号并进行光电转换,并将二极管阵列安装在微机电系统的执行机构上,所述光电二极管阵列采用多个光电二极管并行接收和转换光信号,输出组数与光电二极管数量对应的电信号;

采用微机处理器对光电二极管阵列输出的多组电信号进行处理,微机处理器计算各组信号的相似度或互相关系数大小,去掉偏频电信号组保留有效电信号组,并将有效电信号组输出以进入处理环节和解调环节;

所述执行机构按间隔时间驱动二极管阵列在三维空间内微移动,该微移动量设为扰动输入量,微机处理器根据扰动观察法计算比较扰动前后来自光电二极管阵列的电信号组的相似度,相似度较高的电信号组对应的二极管阵列所在的空间角度设为最优接收角度暂存于微机处理器内,微机处理器将该最优接收角度信息发送至微机电系统,执行机构将二极管阵列调至该最优接收角度,最优接收角度随每次扰动输入得到更新。

2. 根据权利要求1所述的用于LED车灯光通信的自适应接收装置,其特征在于:所述微机处理器输出连接有冗余平均电路,冗余平均电路输出端反馈连接微机处理器且连接有低通滤波电路,低通滤波电路输出连接有整形电路。

3. 根据权利要求2所述的用于LED车灯光通信的自适应接收装置,其特征在于:所述微机处理器包括型号为MC9S12XS128的单片机,所述微机电机构包括型号为NM-XY-100X的微动平台,所述单片机的PWM波形输出端口与微机电机构的输入端连接;

所述光电二极管阵列包括六个定位于微动平台上的GaN基光电二极管,所述多通道放大电路为六通道放大电路,每个光电二极管的正极均连接至一工作电压源,每个光电二极管的负极各自通过一阻值相同的电阻接地,该六个光电二极管的负极经六通道放大电路与单片机的六个A/D输入端一一对应连接;

冗余平均电路包括一型号为LM324C的比较器,该比较器的负输入端接地,正输入端与输出端电阻连接,单片机的AD0端子与比较器的正输入端电阻连接,比较器的输出端与低通滤波电路的输入端、单片机的AD1端子连接。

4. 一种用于LED车灯光通信的自适应接收方法,其特征在于:

采用光电二极管阵列接收LED车灯发射出来的光信号并进行光电转换,并将二极管阵列安装在微机电系统的执行机构上,所述光电二极管阵列采用多个光电二极管并行接收和转换光信号,输出组数与光电二极管数量对应的电信号;

采用微机处理器对光电二极管阵列输出的多组电信号进行处理,微机处理器计算各组信号的相似度或互相关系数大小,去掉偏频电信号组保留有效电信号组,并将有效电信号组输出以进入处理环节和解调环节;

所述执行机构按间隔时间驱动二极管阵列在三维空间内微移动,该微移动量设为扰动输入量,微机处理器根据扰动观察法计算比较扰动前后来自光电二极管阵列的电信号组的相似度,相似度较高的电信号组对应的二极管阵列所在的空间角度设为最优接收角度暂存于微机处理器内,微机处理器将该最优接收角度信息发送至微机电系统,执行机构将二极

管阵列调至该最优接收角度,最优接收角度随每次扰动输入得到更新。

5. 根据权利要求4所述的用于LED车灯光通信的自适应接收方法,其特征在于:所述处理环节包括对有效电信号组的冗余平均处理,得到一路相似度最大信号,该路相似度最大信号反馈回微机处理器作为计算相似度的基准电信号,该路相似度最大信号经低通滤波和整形后进入解调环节。

6. 根据权利要求5所述的用于LED车灯光通信的自适应接收方法,其特征在于:所述微机处理器获得最优接收空间角度的具体计算如下:

步骤a: 设最优接收角度的坐标变量为  $(X^{\text{opt}}, Y^{\text{opt}}, Z^{\text{opt}})$ ;

步骤b: 设第k次扰动输入前接收角度的坐标为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , 其电信号对应的波形组根据波形相似度计算或互相关运算得到有效电信号组  $(V01, \dots, V0n)$ , 该有效电信号组  $(V01, \dots, V0n)$  冗余平均后得到一路相似度最大信号  $V_k$ , 该路相似度最大信号  $V_k$  与第k-1次扰动输入前的相似度最大信号  $V_{k-1}$  比较, 得到相似度值为  $f_{k-1}$ ;

步骤c: 第k次扰动输入, 扰动量为  $(\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0)$ , 扰动后的接收角度的坐标为  $(X_0 + \Delta X_0, Y_0 + \Delta Y_0, Z_0 + \Delta Z_0)$ , 其电信号相对的波形组根据波形相似度计算或互相关运算得到有效电信号组  $(V11, \dots, V1m)$ , 该有效电信号组  $(V11, \dots, V1m)$  冗余平均后得到一路相似度最大信号  $V_{k+1}$ , 该路相似度最大信号  $V_{k+1}$  与第k次扰动输入前的相似度最大信号  $V_k$  比较, 得到相似度值为  $f_k$ ;

步骤d: 比较  $f_{k-1}$  与  $f_k$  的值,

若  $f_{k-1} > f_k$ , 令  $(X^{\text{opt}}, Y^{\text{opt}}, Z^{\text{opt}})$  取值  $(X_0, Y_0, Z_0)$ ,

其余结果, 令  $(X^{\text{opt}}, Y^{\text{opt}}, Z^{\text{opt}})$  取值  $(X_0 + \Delta X_0, Y_0 + \Delta Y_0, Z_0 + \Delta Z_0)$ 。

7. 根据权利要求6所述的用于LED车灯光通信的自适应接收方法, 其特征在于: 所述扰动量  $(\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0)$  取三维合成方向, 执行机构对应移动0.01mm。

## 一种用于LED车灯光通信的自适应接收装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及车联网中的可见光通信技术,具体是一种在用于LED车灯光通信的自适应接收装置及方法。

### 背景技术

[0002] LED照明光无线通信因其具有安全、经济且高速的特点而极具发展前景,虽然该技术在海外尚处于起步和摸索阶段,但其应用前景非常看好,不仅可以用于室内无线接入,还可以为城市车辆的移动导航及定位提供一种全新的方法。汽车照明灯基本都采用LED灯,可以组成汽车与交通控制中心、交通信号灯至汽车、汽车至汽车的通信链路,这也是LED可见光通信在智能交通系统的发展方向。

[0003] 如CN 202524390公开的一种LED通信照明装置及基于该装置的机动车灯光系统,它包括定点LED灯光通信装置和移动LED灯光通信装置;所述定点LED灯光通信装置是由依次电连接的第一光电探测器、第一信息处理单元、第一驱动电路和LED灯光发射器构成,在第一信息处理单元的输出还分别连接有第一执行器和第一显示器;所述移动LED灯光通信装置是由依次电连接的第二光电探测器、第二信息处理单元、第二驱动电路和LED前灯构成。该技术实现了不停车缴费,使车道的通行能力提高3~5倍,还实现了交通车辆动态信息的快速采集,并且还可以有效避免前后车辆车距太近,防止汽车之间的相互追尾的恶性交通事故。

[0004] 又如CN 102610115A公开的一种基于LED可见光通信的智能交通系统,属于智能交通系统领域,包括:LED交通灯、光发射机、和光接收机,光接收机和光发射机安装在一个车辆上,后面一辆汽车的光接收机接收前面一辆汽车上光发射机发出的信号,LED交通灯中发送的信号中包含路况情况和红绿灯情况,光发射机所发送的信号中包含前后车辆间的距离和警示信号,光接收机接收LED交通灯、光发射机发出的信号。通过上述方式,本技术能够形成可见光智能交通网络,及时地接收LED交通灯发出的路况信息、前后车辆间的距离、警示信号和红绿灯情况,保证了交通安全,降低了交通事故发生的概率。

[0005] 然而,由于车辆是移动的,在如上述两个系统中,车对光信号接收的可靠性和稳定性问题成为LED可见光通信在智能交通系统运用中首要难题。并且,在车辆高速行驶以及转弯的时候,车与车之间的位置关系变化急速,使得该问题更为突出,信号干扰大以及信号弱或缺失都极易造成通讯失败,引发交通事故。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种用于LED车灯光通信的自适应接收装置及方法,其能够解决现有技术中车对光信号接收的可靠性和稳定性问题。

[0007] 本发明的技术方案如下:包括光电转换模块和与该光电转换模块连接的微机处理器,所述光电转换电路包括接收光信号的光电二极管阵列和多通道放大电路,所述光电二极管阵列的输出端经多通道放大电路与微机处理器连接,该光电二极管阵列安装在一微机

电机构上,所述微机处理器控制连接微机电机构。

[0008] 进一步,所述微机处理器输出连接有冗余平均电路,冗余平均电路输出端反馈连接微机处理器且连接有低通滤波电路,低通滤波电路输出连接有整形电路。

[0009] 更进一步,所述微机处理器包括型号为MC9S12XS128的单片机,所述微机电机构包括型号为NM-XY-100X,的微动平台,所述单片机的PWM波形输出端口与微机电机构的输入端连接;所述光电二极管阵列包括六个定位于微动平台上的GaN基光电二极管,所述多通道放大电路为六通道放大电路,每个光电二极管的正极均连接至一工作电压源,每个光电二极管的负极各自通过一阻值相同的电阻接地,该六个光电二极管的负极经六通道放大电路与单片机的其中六个PAD端子一一对应连接;冗余平均电路包括一型号为LM324C的比较器,该比较器的负输入端接地,正输入端与输出端电阻连接,单片机的PA0~PA3端子与比较器的正输入端一一对应电阻连接,比较器的输出端与低通滤波电路的输入端、单片机的另一PAD端子连接。

[0010] 同时,本发明还提供了一种用于LED车灯光通信的自适应接收方法,其采用光电二极管阵列接收LED车灯发射出来的光信号并进行光电转换,并将二极管阵列安装在微机电系统的执行机构上,所述光电二极管阵列采用多个光电二极管并行接收和转换光信号,输出组数与光电二极管数量对应的电信号。采用微机处理器对光电二极管阵列输出的多组电信号进行处理,微机处理器计算各组信号的相似度或互相关系数大小,去掉偏频电信号组保留有效电信号组,并将有效电信号组输出以进入处理环节和解调环节。所述执行机构按间隔时间驱动二极管阵列在三维空间内微移动,该微移动量设为扰动输入量,微机处理器根据扰动观察法计算比较扰动前后来自光电二极管阵列的电信号组的相似度,相似度较高的电信号组对应的二极管阵列所在的空间角度设为最优接收角度暂存于微机处理器内,微机处理器将该最优接收角度信息发送至微机电系统,执行机构将二极管阵列调至该最优接收角度,最优接收角度随每次扰动输入得到更新。

[0011] 进一步,所述处理环节包括对有效电信号组的冗余平均处理,得到一路相似度最大信号,该路相似度最大信号反馈回微机处理器作为计算相似度的基准电信号,该路相似度最大信号经低通滤波和整形后进入解调环节。

[0012] 进一步,所述微机处理器获得最优接收空间角度的具体计算如下:

[0013] 步骤a:设最优接收角度的坐标变量为 $(X^{opt}, Y^{opt}, Z^{opt})$ 。

[0014] 步骤b:设第k次扰动输入前接收角度的坐标为 $(X_0, Y_0, Z_0)$ ,其电信号对应的波形组根据波形相似度计算或互相关运算得到有效电信号组 $(V01, \dots, V0n)$ ,该有效电信号组 $(V01, \dots, V0n)$ 冗余平均后得到一路相似度最大信号 $V_k$ ,该路相似度最大信号 $V_k$ 与第k-1次扰动输入前的相似度最大信号 $V_{k-1}$ 比较,得到相似度值为 $f_{k-1}$ 。

[0015] 步骤c:第k次扰动输入,扰动量为 $(\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0)$ ,扰动后的接收角度的坐标为 $(X_0 + \Delta X_0, Y_0 + \Delta Y_0, Z_0 + \Delta Z_0)$ ,其电信号相对的波形组根据波形相似度计算或互相关运算得到有效电信号组 $(V11, \dots, V1m)$ ,该有效电信号组 $(V11, \dots, V1m)$ 冗余平均后得到一路相似度最大信号 $V_{k+1}$ ,该路相似度最大信号 $V_{k+1}$ 与第k次扰动输入前的相似度最大信号 $V_k$ 比较,得到相似度值为 $f_k$ 。

[0016] 步骤d:比较 $f_{k-1}$ 与 $f_k$ 的值,

[0017] 若 $f_{k-1} > f_k$ ,令 $(X^{opt}, Y^{opt}, Z^{opt})$ 取值 $(X_0, Y_0, Z_0)$ ,

[0018] 其余结果,令  $(X^{\text{opt}}, Y^{\text{opt}}, Z^{\text{opt}})$  取值  $(X_0 + \Delta X_0, Y_0 + \Delta Y_0, Z_0 + \Delta Z_0)$ 。

[0019] 优选的,所述扰动量  $(\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0)$  取三维合成方向,执行机构对应移动 0.01mm。

[0020] 本发明利用GaN二极管阵列实现光电转换,扩大了接收角度,抑制了外部环境光的干扰,同时对多路信号采用冗余平均技术,且把GaN二极管阵列封装在微机电结构上,在此基础上结合扰动观察法由微机处理器实现最优接收空间角度  $\{X^{\text{opt}}, Y^{\text{opt}}, Z^{\text{opt}}\}$  的计算和控制,增强了对光信号的跟踪能力。相比传统雪崩光电二极管、硅光电二极管的昂贵价格和弱光谱选择能力,本方案中的GaN基底的LED具有廉价、光谱带窄等优点。简言之,本方案对光信号的灵敏度高,接收角度大,动态跟踪能力强,解决了车车之间发送及接收的位置关系的时变问题,尤其有利于车与车之间的光通信。

## 附图说明

[0021] 图1为本发明一种用于LED车灯光通信的自适应接收装置的系统结构图;

[0022] 图2为图1中光电转换电路的原理图;

[0023] 图3为图1中冗余平均电路的一种具体原理图;

[0024] 图4为图1中低通滤波电路的一种具体原理图;

[0025] 图5为本发明微机处理器计算最优接收空间角度的程序流程图。

## 具体实施方式

[0026] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步的描述。

[0027] 一种用于LED车灯光通信的自适应接收装置,接收来自其它车辆通过LED车灯(可以是前车灯也可以是后车灯)发射来的光信号。本装置如图1所示,包含光电转换模块、微机处理器4和微机电机构3,电转换模块中的光电二极管阵列1作为接收和转换光信号的器件安装在微机电机构3上,采用包含多只二极管的阵列形式,光电二极管阵列1能够在较大角度范围内接收到光信号,且对应二极管的个数输出多路电信号,后经多通道放大电路2放大至标准信号输入微机处理器4。由于各光电二极管相对于光信号发射源的位置不同,因此接收到的各路信号强度也不同,微机处理器4对各路信号进行识别和筛选。通常情况下,本装置相对光信号发射源是运动的,微机处理器4根据信号的接收情况,控制微机电机构3移动,进而调整光电二极管阵列1的接收角度,以保持实时的跟踪接收,获得较优的信号。

[0028] 为信号的调解更准确,所述微机处理器4输出连接有冗余平均电路5以将若干路信号处理成一路信号,该路信号偏差小相似度高。所述冗余平均电路5输出连接有低通滤波电路6,所述低通滤波电路6输出连接有整形电路7,信号进一步得到去噪和规整,利于信号的解调。

[0029] 本装置的微机处理器4选用处理能力不低于型号为MC9S12XS128的单片机,以该型号的单片机为例,其控制输出端的微机电机构3可选用型号为NM-XY-100X的MEMS系统,单片机的三个PWM波形输出端口与微机电机构3的输入端连接;

[0030] 所述光电二极管阵列1包含多只GaN基光电二极管,工作时,可选用其中均布在各部的六只D1~D6,如图2所示,每个光电二极管的正极均连接至一工作电压源Vcc,光电二极管D1~D6的负极一一对应阻值相同的电阻R1~R6接地,该六个光电二极管的负极经六通道

放大电路与单片机的其中六个PAD端子一一对应连接,D1~D6的负极处的电压值与其自身接收到的光信号对应,即为光电转换后的电信号。

[0031] 所述冗余平均电路5为加法平均电路,如图3所示,其包括一型号为LM324C的比较器,该比较器的负输入端接地、正输入端与输出端通过电阻 $R_f$ 连接,六路信号经单片机筛除偏颇信号后,保留四路信号,单片机的PA0~PA3端子与比较器的正输入端通过电阻 $R_a$ 、 $R_b$ 、 $R_c$ 连接,比较器的输出端V0与低通滤波电路6的输入端、单片机的另一PAD端子连接。

[0032] 低通滤波电路6和整形电路7采用现有技术即可,如图4所示的一种二阶低通滤波电路。

[0033] 一种用于LED车灯光通信的自适应接收方法:采用光电二极管阵列1接收LED车灯发射出来的光信号并进行光电转换,并将二极管阵列安装在微机电系统的执行机构上,所述光电二极管阵列1采用多个光电二极管并行接收和转换光信号,输出组数与光电二极管数量对应的电信号。

[0034] 采用微机处理器4对光电二极管阵列1输出的多组电信号进行处理,微机处理器4计算各组信号的相似度或互相关系数大小,去掉偏颇电信号组保留有效电信号组,如光电二极管阵列1输出六组电信号,可筛除两路电信号后保留四组电信号,将这四组电信号储存;同时,这四组电信号实时地进入处理环节和解调环节。

[0035] 所述执行机构按间隔时间驱动二极管阵列在三维空间内微移动,该微移动量设为扰动输入量,微机处理器4根据扰动观察法计算扰动前后来自光电二极管阵列1的电信号组的相似度,比较扰动前还是扰动后的电信号组相似度哪个综合较高。相似度较高的电信号组对应的二极管阵列所在的空间角度设为最优接收角度暂存于微机处理器4内,微机处理器4将该最优接收角度信息发送至微机电系统,执行机构将二极管阵列调至该最优接收角度,最优接收角度随每次扰动输入得到更新。这些计算过程由微机处理器4按程序代码执行,程序的原理流程图如图5所示。

[0036] 上述处理环节包括对有效电信号组的冗余平均处理,得到一路相似度最大信号,该路相似度最大信号经低通滤波和整形后得到完美的信号,进入解调环节。由于多组电信号与多组电信号计算相似度的量较大,为简化计算,提高可实施性,用上述的一路相似度最大信号代表其所在电信号组,用于计算和比较相似度值。因此,该路相似度最大信号反馈回微机处理器4作为计算相似度的基准电信号。

[0037] 进一步说明,计算最优接收空间角度的步骤如下:

[0038] 步骤a:设最优接收角度的坐标变量为 $(X^{opt}, Y^{opt}, Z^{opt})$ ;

[0039] 步骤b:设第k次扰动输入前接收角度的坐标为 $(X_0, Y_0, Z_0)$ ,其电信号对应的波形组根据波形相似度计算或互相关运算得到有效电信号组 $(V01, \dots, V0n)$ ,该有效电信号组 $(V01, \dots, V0n)$ 冗余平均后得到一路相似度最大信号 $V_k$ ,该路相似度最大信号 $V_k$ 与第k-1次扰动输入前的相似度最大信号 $V_{k-1}$ 比较,得到相似度值为 $f_{k-1}$ ;

[0040] 步骤c:第k次扰动输入,扰动量为 $(\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0)$ ,扰动后的接收角度的坐标为 $(X_0 + \Delta X_0, Y_0 + \Delta Y_0, Z_0 + \Delta Z_0)$ ,其电信号相对的波形组根据波形相似度计算或互相关运算得到有效电信号组 $(V11, \dots, V1m)$ ,该有效电信号组 $(V11, \dots, V1m)$ 冗余平均后得到一路相似度最大信号 $V_{k+1}$ ,该路相似度最大信号 $V_{k+1}$ 与第k次扰动输入前的相似度最大信号 $V_k$ 比较,得到相似度值为 $f_k$ ;

[0041] 步骤d:比较 $f_{k-1}$ 与 $f_k$ 的值,

[0042] 若 $f_{k-1} > f_k$ ,令 $(X^{\text{opt}}, Y^{\text{opt}}, Z^{\text{opt}})$ 取值 $(X_0, Y_0, Z_0)$ ,

[0043] 其余结果,令 $(X^{\text{opt}}, Y^{\text{opt}}, Z^{\text{opt}})$ 取值 $(X_0 + \Delta X_0, Y_0 + \Delta Y_0, Z_0 + \Delta Z_0)$ 。

[0044] 在计算最优接收空间角度的持续过程中,最优接收角度的坐标变量 $(X^{\text{opt}}, Y^{\text{opt}}, Z^{\text{opt}})$ 由前次扰动后是确定坐标的。而在刚开始求最优接收空间角度的时候,由于之前没有扰动,可以以二极管阵列当前的接收角度初始赋值,在随后的多次扰动中得到不断修正。

[0045] 相似度的计算原理,根据信号处理技术,有:

[0046]  $k$ 时刻的相似度大小矩阵为: $\mathbf{S}^k = \mathbf{v}^k \otimes \mathbf{v}^{k-1}$ ,其中, $\otimes$ 表示卷积算子, $k$ 时刻的前一时刻的信号组 $\mathbf{v}^{k-1} (V_1, \dots, V_i, \dots, V_j, \dots, V_n)$ 作为当前 $k$ 时刻检测信号组 $\mathbf{v}^k$ 的基准波。

[0047] 定义的相似度值 $f(\mathbf{V}_1, \dots, \mathbf{V}_n) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \text{step}(\mathbf{S}_{i,j}^k > s_{th})$ ,其中 $\text{step}(\cdot)$ 表示单位阶跃函数, $s_{th}$ 为定义的阈值。

[0048] 上述计算原理中,在具体实施时 $s_{th}$ 常取值为0.8,二极管阵列信号通道数常取6~10个。该计算过程较为复杂,而现有技术中已有专用的卷积和相似度计算函数,程序编写时直接调用即可。

[0049] 在实际运用中,如果每次的扰动量只作用在一维方向上,则调整至最优接收角度所需的调整次数和运算次数将会大幅度增加,找到最优接收角度的速度将会变慢,而车辆是运动的,这样不但容易导致执行机构不停地调整却不能停留到相对稳定的状态,影响到信号的接收效果,还对微机处理器4的运算速度及微机电系统的响应速度提出了极高的要求。因此,较实用且易于实施的,所述扰动量 $(\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0)$ 取三维合成方向,执行机构对应移动0.01mm,即可满足自适应追踪效果。

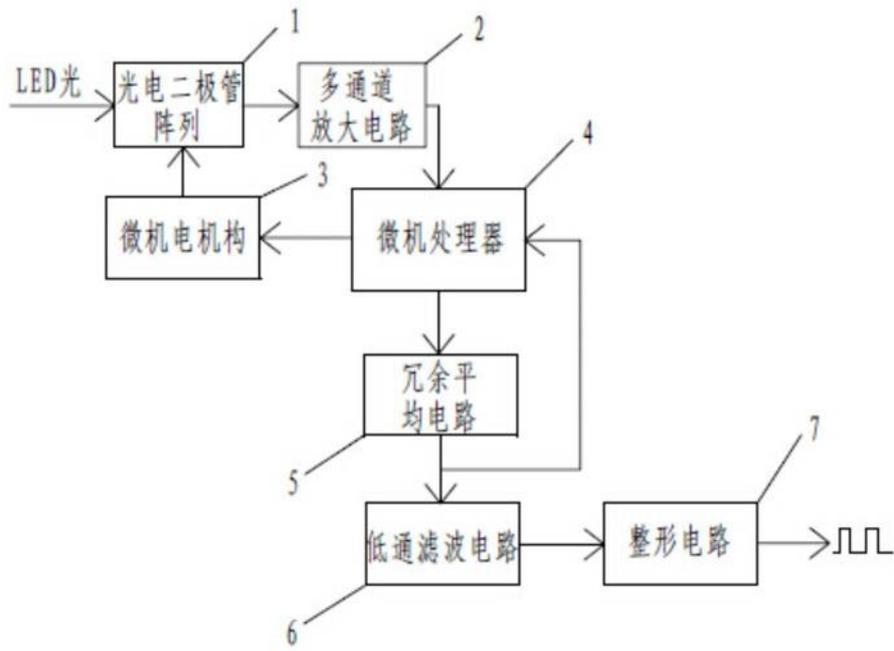


图1

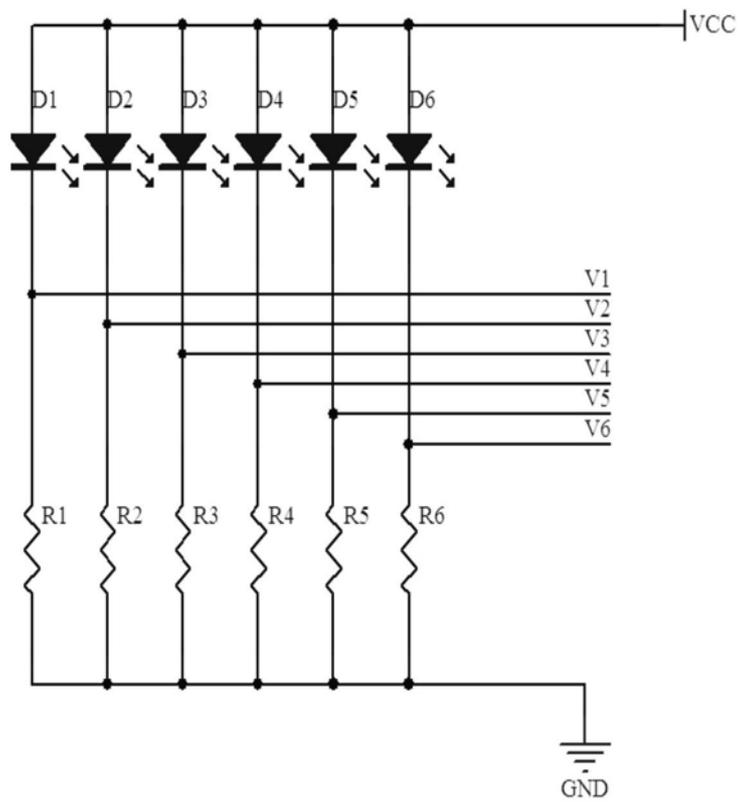


图2

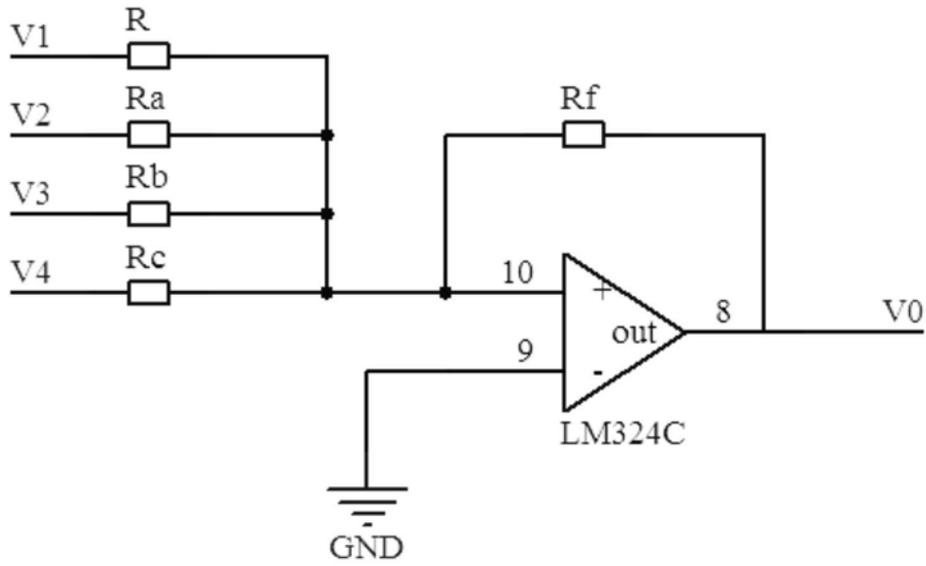


图3

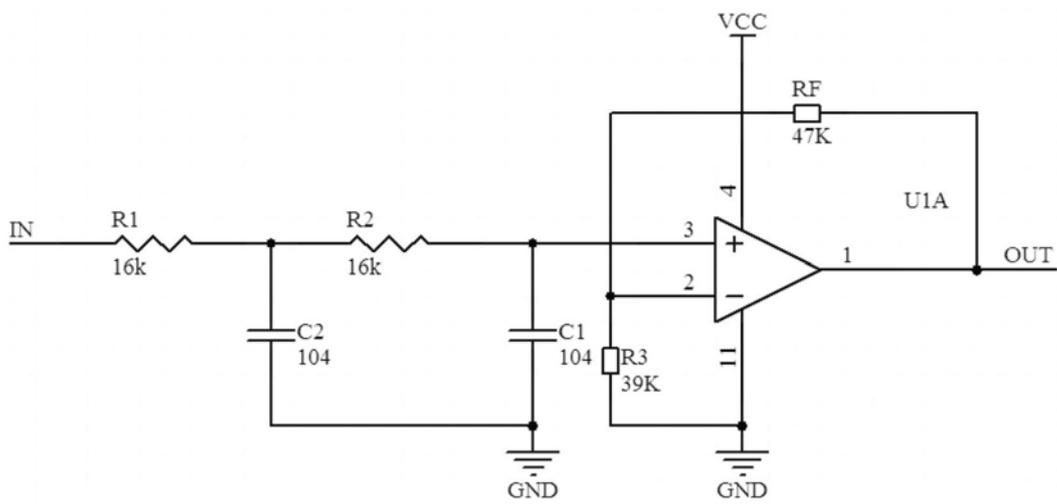


图4

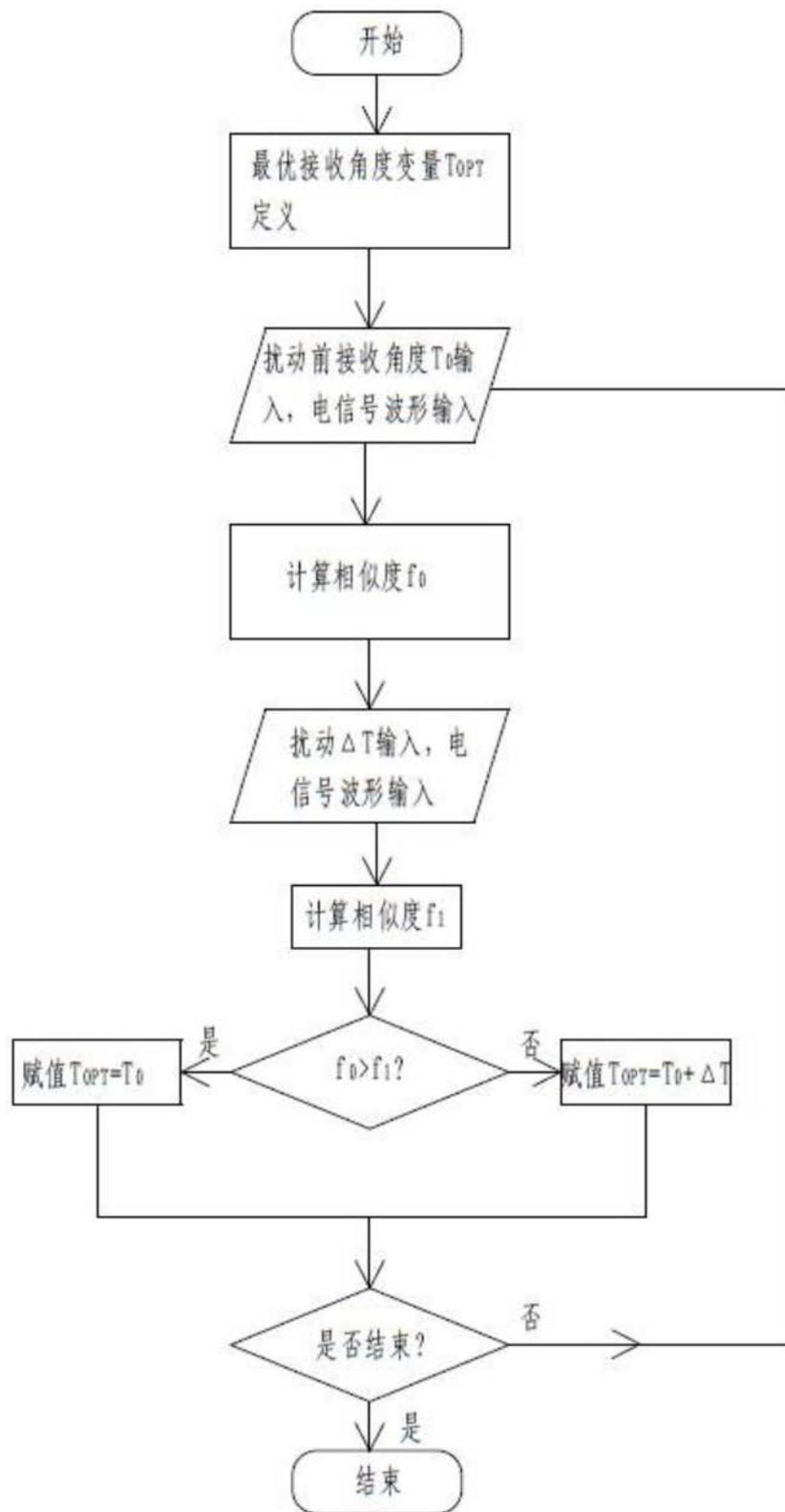


图5