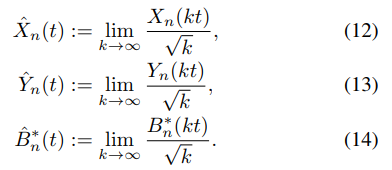
在这篇论文中，利用视频流的播放中断总持续时间来测量每个视频流的QoE。评估无线网络QoE的一种常见方法是通过长期平均性能，其正式定义如下。

定义1：如果存在调度策略E:\qq下载\MobileFile\Image\AQGK~KRDO~OGJIERS)GU4DC.png，使得对于所有n，几乎可以肯定，E:\qq下载\MobileFile\Image\P5KN1)8VEY~BEO_L4AZK8TP.png，则认为视频流系统是稳定的。此外，是QoE的一种稳定调度策略。

换句话说，如果视频中断的总持续时间在有限时间之后亚线性增长，则无线视频流系统是稳定的。可以很容易地证明，E:\qq下载\MobileFile\Image\{YEZD9EXSF8US3$1GBMAOQW.png如果并且仅当每个客户端的长期平均吞吐量至少为qn[16]。如果，那么E:\qq下载\MobileFile\Image\A[F}0OC4`6_}PLVOR$0E%WX.png几乎肯定会变成负无穷大，如E:\qq下载\MobileFile\Image\_3I7%ET~K`IX{V%){)$99F9.png。由(8)可知，因为E:\qq下载\MobileFile\Image\PM6%9)J8KY)USKQ_UW[6I)R.png总是非负的，所以E:\qq下载\MobileFile\Image\PH$UK4CJ}LST7IJAN04)0NU.png意味着E:\qq下载\MobileFile\Image\[S%E7Q0%{MZK[]NU2U@DYPQ.png几乎可以肯定地成为E:\qq下载\MobileFile\Image\_3I7%ET~K`IX{V%){)$99F9.png的无穷大。因此，研究系统是否稳定等同于研究可达到吞吐量的容量区域。然而，这个定义不能描述系统在重交通状况下的行为。为了充分刻画回放中断随时间的增长特性，本文利用扩散极限研究了回放中断的动态行为。此外，在第五节中，我们将将此策略与其他流行的调度策略进行比较，这些策略对于QoE都是稳定的，但在短期性能上有很大差异。

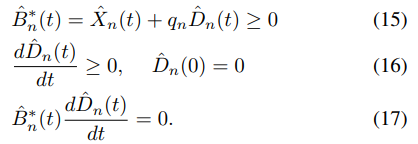
为了研究大流量环境下的视频中断行为，我们考虑Dn(t)的扩散极限，定义为E:\qq下载\MobileFile\Image\`YZ6T%3]HQPBXGV%`~F~S{8.png

类似地，我们定义



事实上，因为Yn(t)是有界的，所以对于所有t有E:\qq下载\MobileFile\Image\[9{0LYB(ACP(QS$SF`R21M9.png。给定(5)–(10)中的性质，我们就有下面的定理。

定理1：给定E:\qq下载\MobileFile\Image\]IH~B}B$O3WQWPHY}(4XOBM.png，存在唯一的一对满足



此外，E:\qq下载\MobileFile\Image\$XL_)QDIQBCV99C6GL(ICGN.png可以表示为

证明：这是[16]中定理1的直接结果。

基于定理1，我们首先刻画了E:\qq下载\MobileFile\Image\]IH~B}B$O3WQWPHY}(4XOBM.png的特征，然后在下面几节中根据(18)导出E:\qq下载\MobileFile\Image\$XL_)QDIQBCV99C6GL(ICGN.png。与[16]不同，本文研究了时变信道下视频流的QoE。

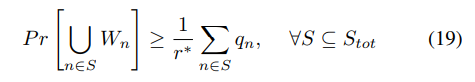
为了区分对和对E:\qq下载\MobileFile\Image\$XL_)QDIQBCV99C6GL(ICGN.png的分析，我们用稳定域表示可稳定系统集合，用容量域表示可达向量集合。第四节介绍了容量区域的更正式的定义。

## 三、ON-OFF通道的稳定区域

我们首先考虑ON-OFF信道的特殊情况，其中每个客户端的传输速率只能是零或正值E:\qq下载\MobileFile\Image\@}]51T8FG%}57D2`EZMAYG9.png，因此。

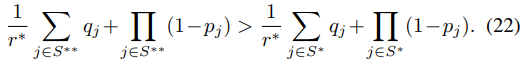
ON-OFF信道的稳定性区域已经被证明与一组充要条件[17]、[18]相关。我们总结了以下结果。

引理1：[17，定理1]设E:\qq下载\MobileFile\Image\{]%0_)E`@QLDWHNXZTYF77F.png是客户端n具有ON通道的事件，即E:\qq下载\MobileFile\Image\`)K7JEKQK~8[2%}9S1JCKGN.png。具有ON-OFF信道的视频流系统是稳定的，如果并且仅当视频回放速率E:\qq下载\MobileFile\Image\4_VRW7MW8}~LLJC31ZVP%Q6.png满足以下等式：

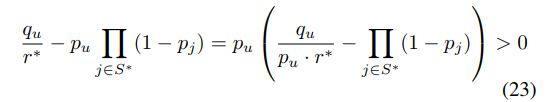


上述条件要求检查（19）所有子集，这可能是棘手的。然而，对于不同客户端的信道条件独立的特殊情况，我们可以导出多项式时间算法来检查系统是否稳定。该算法在下面的定理中描述。

定理2：设E:\qq下载\MobileFile\Image\FZN_3T%WZ0P@FM@D20M0Z5I.png是客户机n具有ON信道的概率，E:\qq下载\MobileFile\Image\36)VP~CBN__SZE)0)J3)VTF.png。假设客户机是按E:\qq下载\MobileFile\Image\[E9P{56ADG~W]S9[OPCZ[`I.png按降序排序的，E:\qq下载\MobileFile\Image\)X}1D$]CSS`1M9FY)}Q`XOV.pngE:\qq下载\MobileFile\Image\WFWV65G2D7]YPOPFADZ(}WC.png用E:\qq下载\MobileFile\Image\OKRUNNR7QN]KRC[@6%M[{VH.png表示所有客户机的子集E:\qq下载\MobileFile\Image\RS@K6C2HRP~Z]A@@$3YLK0F.png。然后，当且仅当E:\qq下载\MobileFile\Image\BD1A%M]U4V$2GKA2[C4K4SN.png此外，检查此条件的复杂性是E:\qq下载\MobileFile\Image\$0C9YNM45$G1~6J4FHG260G.png.

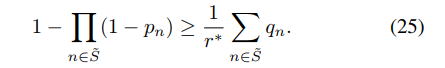
证明：通过引理1，我们可以写出独立的开-关通道的充要条件，如E:\qq下载\MobileFile\Image\0$)WGG2ZXA`)2C95EPO%VHF.png在必要条件方面，(21)当然意味着(20)。现在，我们用矛盾来证明充分部分。假设整个系统不稳定。因此，至少存在一个最小的不稳定子集，如E:\qq下载\MobileFile\Image\$QZ5`2A]3B8LR%A{Y%}85PB.png。设m是E:\qq下载\MobileFile\Image\$QZ5`2A]3B8LR%A{Y%}85PB.png最大元素.如果E:\qq下载\MobileFile\Image\T8[O4MP}GRUK{`K%]]G87LR.png，则证明是完整的。否则，假设u是E:\qq下载\MobileFile\Image\47F8S%M)XLFOHAKRG%0P8LS.png和E:\qq下载\MobileFile\Image\G`QHBYLAQL[))Q[LD$0H`@X.png中的最大元素。因此，我们定义E:\qq下载\MobileFile\Image\6M_}5HE69UY6S63TWQ8TK~H.png。首先，我们要表明。

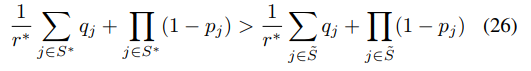
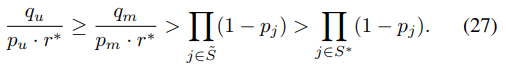
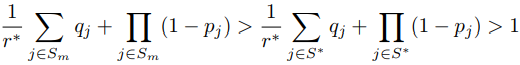
通过从(22)的左边减去(22)的右边，我们只需要证明



由于E:\qq下载\MobileFile\Image\$QZ5`2A]3B8LR%A{Y%}85PB.png是最小的不稳定集，我们有E:\qq下载\MobileFile\Image\E28EK1W(O1GUVV22}7~$7HA.png

通过在(24)中选择E:\qq下载\MobileFile\Image\V82YK)H}HCI2DJ`CORCP@SK.png，E:\qq下载\MobileFile\Image\3OJ_04U29L_VF47QDALPNJN.png应该是稳定的，因此我们有

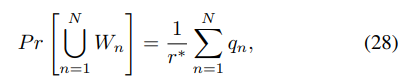
从（24）和（25），我们有

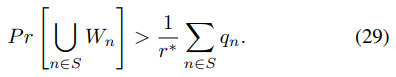
 或者等同。E:\qq下载\MobileFile\Image\G3UOY}JEIOH)LO@$CCQ65NL.png既然 E:\qq下载\MobileFile\Image\V`IFR191QGKGH{F24TJY`JJ.png，我们可以得到因此，(22)和(23)都保持不变。如果E:\qq下载\MobileFile\Image\0S4N5M@(Y%TW)4%A7%H5`LP.png，则证明是完整的。否则，我们继续寻找E:\qq下载\MobileFile\Image\WO{F2VQZ0P9PDTLD1]KB[3M.png中的最大元素，并重复(22)–(27)所示的相同过程。通过归纳，我们终于有了

这与（20）给出的条件相矛盾。由于该算法的时间复杂度主要由E:\qq下载\MobileFile\Image\LK)G1302QJ7N[6NEUKJ60IM.png的预排序决定，因此总体复杂度为E:\qq下载\MobileFile\Image\OXP9QOF_JW`)_7LF52S`$ZL.png。

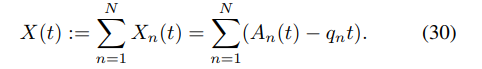
## 四、开关通道的重交通分析

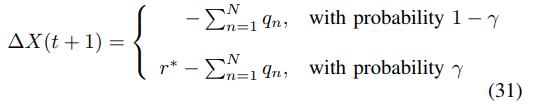
我们特别感兴趣的是视频回放速率E:\qq下载\MobileFile\Image\66HVIAJA40RUO``IY)$(YK7.png的集合在稳定区域的边界上的情况，即，在重流量条件下。回想一下，E:\qq下载\MobileFile\Image\{]%0_)E`@QLDWHNXZTYF77F.png表示客户端n具有ON通道的事件。在本节中，我们假定，

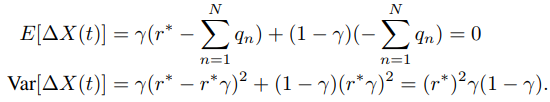
而对于任何子集E:\qq下载\MobileFile\Image\3H8(E1B0ITJ7KF%X%59H`MF.png

约束（29）对应于[19]中的完整资源池条件。

### A.QoE容量区域的下界

我们导出了在大流量条件下具有ON-OFF信道的E:\qq下载\MobileFile\Image\[N{RTW$W(UD3ZXEO5OSP}D6.png的基本性质。让我们定义一个随机过程设E:\qq下载\MobileFile\Image\8B}BQ6H1VGP(JSK($DOE56V.png是![E:\qq下载\MobileFile\Image\0$20`UZ](OMF~Y{3XTN%0DR.png](data:image/png;base64,)的变化量，对于所有E:\qq下载\MobileFile\Image\0383SCB1GPO$D_O415R%SBN.png。不管调度策略如何，如果E:\qq下载\MobileFile\Image\%W$8%OC[D~QM5X5{V8}H[T8.png中的至少一个客户机具有ON信道，则AP可以向某个客户机n精确地传递E:\qq下载\MobileFile\Image\210X@(E]N$0`M9KC%20``(L.png比特。让E:\qq下载\MobileFile\Image\UHVFLOO@Z{G4E@D7PLHRFAN.png无论哪个客户在时刻E:\qq下载\MobileFile\Image\QYJTLGE}2N6CNQPP@[4%W8D.png被调度，我们都有

。(31)中的方程不考虑时间而成立，因此E:\qq下载\MobileFile\Image\X0437}UFUV0)]K5_L}6P0MT.png是跨越所有时隙的E:\qq下载\MobileFile\Image\(5EJNKG]BY])V%@@OE@XMTX.png.由于(28)给出的拥挤交通假设，我们还有



通过E:\qq下载\MobileFile\Image\(5EJNKG]BY])V%@@OE@XMTX.png.随机变量的泛函中心极限定理[20]，关于X(t)的扩散极限，我们有以下重要性质。

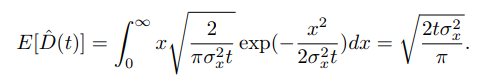
定理3:设E:\qq下载\MobileFile\Image\3ANA76YKI32QDCU2KYVY(GL.png.然后E:\qq下载\MobileFile\Image\@2KGEX3U33S(BR`D9V%~]`O.png是无偏移的布朗运动，方差为E:\qq下载\MobileFile\Image\IR]8`YE5@)B{@[8JXA9W`D9.png，其中E:\qq下载\MobileFile\Image\8I~}LUWLK]Z644I9@DL}RRD.png E:\qq下载\MobileFile\Image\HEO[H90P5E)($C435X]LU$H.png。此外，给定E:\qq下载\MobileFile\Image\EES32`~ND(95{U9LKKPM(IB.png，对于任意E:\qq下载\MobileFile\Image\YOI[2}J%6AA(}NC5BZ66AC6.png，E:\qq下载\MobileFile\Image\T9TCH[J`N6SED5J`NB84)_8.png都是高斯随机变量。均值为零，方差为E:\qq下载\MobileFile\Image\)]9[YB6S05D~958L63~Q9ZI.png。

与(18)类似，我们定义E:\qq下载\MobileFile\Image\{O]]]885$C)9`]QN]F[SP$2.png由于 E:\qq下载\MobileFile\Image\53NY3R2RF2L$10925JI6[BD.png是布朗运动，因此我们可以基于以下引理导出E:\qq下载\MobileFile\Image\9UEVDB({7T10MUU%1XLM`{A.png的分布和重要统计量。

引理2：[21，第1.6节]设E:\qq下载\MobileFile\Image\L3DRV1KR@5YPTRS{J0JJQPX.png是具有零均值和单位方差的标准高斯随机变量的累积分布函数(CDF)。E:\qq下载\MobileFile\Image\9UEVDB({7T10MUU%1XLM`{A.png的CDF由下式给出

E:\qq下载\MobileFile\Image\CM%]9(K2[AI1QIDE8YC@6VR.png

对于所有E:\qq下载\MobileFile\Image\~YHW6C8PC@OQHQ}~5A7Q)FQ.png。E:\qq下载\MobileFile\Image\9UEVDB({7T10MUU%1XLM`{A.png的期望值由下式给出



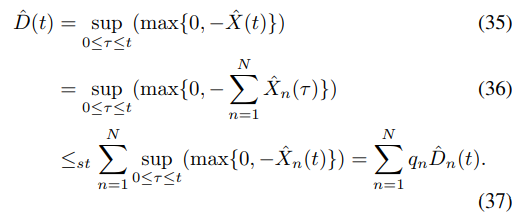
根据E:\qq下载\MobileFile\Image\9UEVDB({7T10MUU%1XLM`{A.png的特性，我们得到了客户端看到的视频中断动态性的一个下界。我们首先引入随机排序的概念，引用[20]。

定义2：设E:\qq下载\MobileFile\Image\`DQIGX(H%VN9Q49_SI%C5AG.png和E:\qq下载\MobileFile\Image\)Q8@_CV0II$35UJ0Z_G$`OU.png分别是策略E:\qq下载\MobileFile\Image\31LA@0I0WD(51$GDI{LE8}S.png和E:\qq下载\MobileFile\Image\L{@@0]LS4A}~RF3{7BBDBFB.png下的两个实值随机过程。我们说E:\qq下载\MobileFile\Image\GBD)36~JOOJ`L(~DNQZ62DW.png如果 E:\qq下载\MobileFile\Image\2U@Y9V((YV}@5KX[YR[76SW.png表示所有E:\qq下载\MobileFile\Image\Q{T8O3ACLMVLNDKAY924YMU.png和任何E:\qq下载\MobileFile\Image\HXRO_F46G`6T@`KOGPH{UZ1.png。

现在，我们可以根据扩散极限![E:\qq下载\MobileFile\Image\0665~1G{P%T6)7NO9]](J$5.png](data:image/png;base64,)和E:\qq下载\MobileFile\Image\K765{6QN}20{(JQ{M$W0{N7.png形式化地定义QoE的容量区域如下。

定义3：如果存在这样的调度策略，则N元组向量E:\qq下载\MobileFile\Image\Y3RHVRC@D)1%}55[M6JZN{O.png是可行的。例如E:\qq下载\MobileFile\Image\[27V8GX2{FJFIFKNC]BVQX0.png然后，将表示的QoE容量区域定义为所有可行向量E:\qq下载\MobileFile\Image\1XS3ZV$UH7Q2JAJ@GW5%EXL.png的集合。

通过在容量区域中选择E:\qq下载\MobileFile\Image\1XS3ZV$UH7Q2JAJ@GW5%EXL.png，我们可以控制每个客户端看到的总的重放中断。在实际应用中，可以由服务提供商给出的合适的定价方案来确定。为了建立![E:\qq下载\MobileFile\Image\0665~1G{P%T6)7NO9]](J$5.png](data:image/png;base64,)和E:\qq下载\MobileFile\Image\K765{6QN}20{(JQ{M$W0{N7.png之间的关系，我们使用E:\qq下载\MobileFile\Image\CFGTL[P}}L%SXD`$]Y)2JWF.png和E:\qq下载\MobileFile\Image\NT5302ESP8KZR0YMW9RF$09.png：



定理4：对于所有的n，E:\qq下载\MobileFile\Image\G%80_O46YEC)}F~(HTB]%TX.png的可行向量E:\qq下载\MobileFile\Image\Y3RHVRC@D)1%}55[M6JZN{O.png必须满足E:\qq下载\MobileFile\Image\1}1G{Z9GK1694RLVAAHEDW5.png。

### B.ON-OFF通道的调度策略

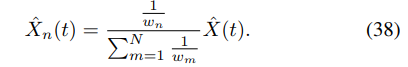
现在，我们介绍了ON-OFF信道的调度策略，并且表明它实现了QoE容量区域内部的每个点。

#### 联合通道不足策略(JCD)：

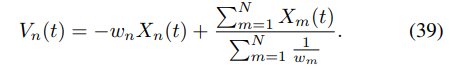
在每个时隙中，AP在具有E:\qq下载\MobileFile\Image\$3M~~(GZ8KH2B47@A_$74U0.png E:\qq下载\MobileFile\Image\C[`19A`6UR}[(M_UGZKN822.png的客户机中调度具有最小值E:\qq下载\MobileFile\Image\~WVMB46_PQ`4}Z88@$CUU23.png的客户机n，其中E:\qq下载\MobileFile\Image\C[PMMW$SE(8IYNG~6JED9~G.png是预定权重因子。

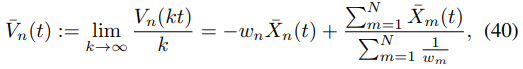
为了证明JCD策略在QoE的容量区域内部达到了每个点，我们首先建立状态空间崩溃特性来刻画每个客户机的扩散极限E:\qq下载\MobileFile\Image\FY7_X1992H[CTID7~DR4M[X.png。

定理5：设E:\qq下载\MobileFile\Image\C[PMMW$SE(8IYNG~6JED9~G.png为AP预先确定的客户端n的权重。对于E:\qq下载\MobileFile\Image\IW1T8UB41{U@SMZ48_TPCCX.png中的任何一对客户端n,m，我们有E:\qq下载\MobileFile\Image\16$5UHNG}@$Q]OC{LEBM0$I.png。此外，我们可以得到



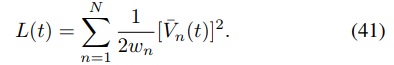
证明：通过引入流体系统，我们证明了状态空间崩溃的性质。首先，定义

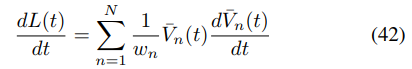
然后，最大E:\qq下载\MobileFile\Image\[%IWABZ$3ZIQ12VY`17O1U1.png与具有最小E:\qq下载\MobileFile\Image\@C0V55G4GT1S1XT~5YDABB0.png的客户端相关联。通过注意到E:\qq下载\MobileFile\Image\6)90MAH7HY6NW)0{]Y`BE}F.png是E:\qq下载\MobileFile\Image\S55$G7@_TRRP~15@F5)@~Y7.png的加权平均值，我们还有最大值E:\qq下载\MobileFile\Image\SI7C3U79RJ(I2957BU~HD3K.png当且仅当 E:\qq下载\MobileFile\Image\@SDGU@M[N35HZ2A$A{TW}$E.png对中的任何对n,m成立等式。接下来，我们考虑这个流体极限E:\qq下载\MobileFile\Image\}W0(A23PO[YN)8X~ITWQ07G.png定义为



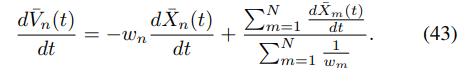
其中Xn(t)的流体极限是E:\qq下载\MobileFile\Image\(_%KDVDM6MXR3USX$ANUZQD.png。

定义李亚普诺夫函数

在不损失一般性的情况下，我们可以假定E:\qq下载\MobileFile\Image\LBCK@E8}91ZNOMA[RD$K$V9.png的流体极限按降序排序，即E:\qq下载\MobileFile\Image\_1S}8D(UF{R1T2)J8TCBG_B.png E:\qq下载\MobileFile\Image\9][$8FTQHVG9~0K8[H$92XY.png。现在，我们推导出李亚普诺夫导函数为



当

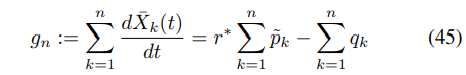
时。

在JCD策略下，对于所有E:\qq下载\MobileFile\Image\97N4F$)LK`WW%`8R1L3~X54.png，当E:\qq下载\MobileFile\Image\JPGEP[IOYV}]B4)6}CC91BR.png和E:\qq下载\MobileFile\Image\PJ$JL0%CMS~$ZG6AGRM%}}T.png时调度客户端n。设

E:\qq下载\MobileFile\Image\UDVGEZ]6QI0F`3%D%8)83)M.png由于 E:\qq下载\MobileFile\Image\OL%MDW1F5$@}N)98Z)AUU%9.png，我们有

E:\qq下载\MobileFile\Image\$~AO)YGO]`4IM%@B71WPMAT.png

我们进一步定义

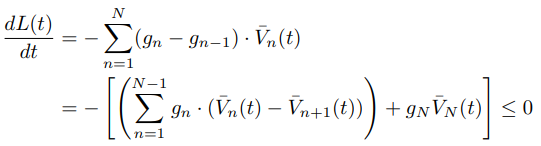


通过使用(28)和(29)给出的条件，我们有

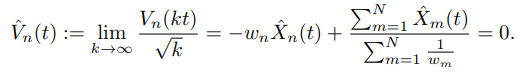
E:\qq下载\MobileFile\Image\Z1JDFO9QP_TVICNKT61NX%3.png

为了方便起见，我们还让E:\qq下载\MobileFile\Image\J%OV8F96VP30HL`4V_O9]_B.png.因此，我们可以重写（43）：

E:\qq下载\MobileFile\Image\GW]~D38$CRKZ_NOJ$XZQSIV.png最后，李亚普诺夫导函数于(42)可以计算为：



此外，只有当E:\qq下载\MobileFile\Image\KR0~NDDZ515]AJJGUX5CPJC.pngE:\qq下载\MobileFile\Image\]}KQ__V@PZS($4IBGQH{7LG.png时，导函数才为零。因此，随机过程E:\qq下载\MobileFile\Image\L}_]D)ZAQ50NS`_457YZ}7D.png是正递归的。因此，我们有

这也意味着，对于任意一对n，m，E:\qq下载\MobileFile\Image\EBEAONKG19EDQ$JINSTL2RA.png，从而完成证明。