

При динамическом регулировании с помощью светофоров, работающих в зависимости от дорожной обстановки, транспортные потоки в различных направлениях фиксируются автоматическими фиксирующими устройствами (детекторами транспортных потоков). Эта информация направляется в центр обработки данных, который каждый раз устанавливает продолжительность отдельных фаз работы светофора в рамках минимальных и максимальных заданных значений. Для одной дорожной сети затруднения в движении при запрещающем сигнале светофора могут создавать негативный эффект: прерывание поступательного движения ТС; образование «хвоста», растягивающегося вплоть до пересечения с предыдущим участком дороги и, как следствие, его блокирование; недостаточное время разрешающего сигнала светофора на следующем пересечении в случае, когда автомобили заблокированы красным сигналом на предыдущем участке. Светофорная синхронизация необходима как раз для оптимизации начальных моментов светофорных фаз на пересечении дорог вдоль всей магистрали или в рамках отдельной дорожной сети. Координация с фиксированным сочетанием циклов требует общего цикла на всех пересечениях дороги (или кратного ему на отдельных пересечениях) и работы системы связи между центрами обработки данных, регулирующими различные пересечения, с тем чтобы обеспечить синхронность их работы. Это последнее требование, естественно, обязательно и для динамической координации, в которой переменные алгоритмов светофорных систем определяются динамически в зависимости от условий дорожного движения, зафиксированных системой мониторинга. Вплоть до последних нескольких лет такая коммуникация могла происходить исключительно по кабельным сетям и потому была сопряжена с довольно высокими затратами на их устройство. Сегодня возможность применения беспроводных линий связи между разными центрами обработки данных позволяет гораздо более широко использовать координацию светофорного регулирования как с фиксированным сочетанием циклов, так и динамическую.

В7.6.1 Принципы светофорного управления

Осуществление маневрирования со светофорным управлением основывается на следующих правилах:

- а) движение различных транспортных потоков организовано согласно последовательности фаз: в каждой фазе светофора допускается, что пересечение занимает группа, совершающая совместимое маневрирование (два различных примера пофазовой организации приведены на рис. 178);
- б) движение допускается в течение действия разрешающего (зеленого) сигнала светофора (и частично желтого, в течение времени, необходимого для освобождения перекрестка теми автомобилями, которые при загоревшемся желтом сигнале не имели возможности остановиться) и запрещено в течение действия запрещающего (красного) сигнала: данное правило дорожного движения в теории образования дорожных заторов соответствует некоему детерминистскому циклично изменяемому служебному времени;
- в) зеленый, желтый и красный сигналы светофора для каждого потока i циклично сменяют один другой (длительность суммарного периода зеленого G_i , желтого Y_i и красного R_i называется светофорным циклом и обозначается символом C).

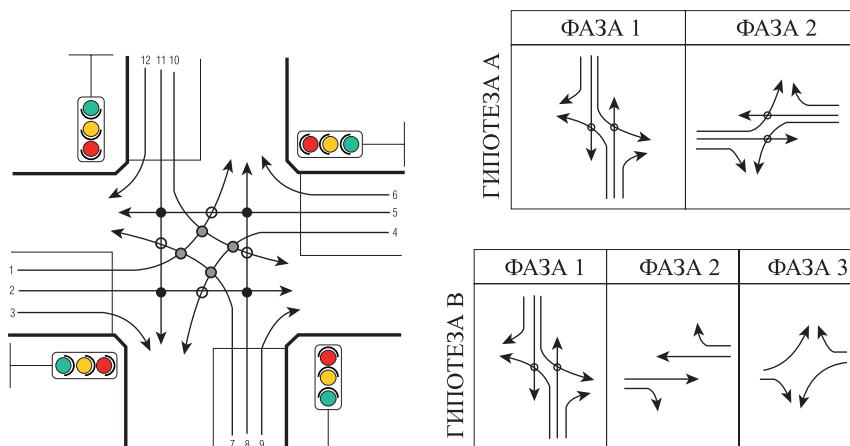


Рис. 178. Конфликтные точки на перекрестках со светофорным регулированием (слева) и два разных варианта организации маневрирования во время действия светофорных фаз (справа)

Среди светофорных параметров значимыми являются отношения зависимости, которые препятствуют одновременному совершению маневрирования в течение действия двух разных фаз. Таким образом, для двухфазного перекрестка мы имеем:

$$R_1 = G_2 + Y_2, \quad R_2 = G_1 + Y_1. \tag{8}$$

Отсюда следует, что длительность цикла составляет:

$$C = G_1 + Y_1 + G_2 + Y_2. \tag{9}$$

Рис. 179 показывает отношение несовместимости, которая определяет чередование периодов времени зеленого и красного сигнала отдельного двухфазного светофора в двух последующих циклах⁹⁸.

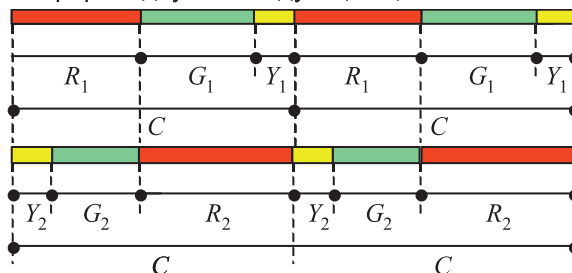


Рис. 179. Чередование периодов времени зеленого и красного сигналов двухфазного светофора

В7.6.2 Предлагаемая модель светофора: «потеря времени» и эффективный зеленый

Для того чтобы определить параметры модели, представим в виде схемы динамику начала движения транспорта при включении разрешающего сигнала светофора, предположив, что в течение некоторого времени I_1 (называемого потерей времени при трогании с места) значение потока будет нулевым

⁹⁸ В этой работе, имеющей по большей части дидактический характер, мы воздержимся от рассмотрения временного значения «полного красного» сигнала светофора или освобождения перекрестка, которое вводится между фазами в качестве «интервала безопасности» и которое с точки зрения функционирования перекрестка может считаться периодом очередной потери времени I_3 , приплюсовываемым к остальным двум периодам.

и что нарастание его характеристик будет происходить с постоянным темпом, который постепенно станет равным пропускной способности s полосы движения до тех пор, пока скопление ТС не исчезнет или пока одно из них не остановится на желтый сигнал светофора. Какой-то частью времени действия желтого сигнала смогут воспользоваться те автомобили, которые на момент его включения находились слишком близко к стоп-линии для того, чтобы остановиться. В то же время оставшаяся часть фазы действия желтого позволяет последнему двигавшемуся автомобилю освободить занятую часть проезжаемого перекрестка. Эта, вторая часть фазы действия желтого, не использованная для проезда, является второй составляющей «потери времени», l_2 , которая называется потерей времени на освобождение перекрестка.

Суммарная потеря времени при обычном движении i , таким образом, соответствует уравнению: $L_i = l_1 + l_2$.

Введение показателя потери времени позволяет настроить работу светофора, сославшись лишь на два единственных активных с точки зрения функциональности условия: активный зеленый g , равный по времени разрешенному проезду минус потеря времени

$$g_i = G_i + Y_i - L_i, \tag{10}$$

и активный красный r , равный общему времени, не использованному автотранспортным потоком

$$r_i = C - g_i. \tag{11}$$

Рис. 180 описывает переход от привычной светофорной последовательности сигналов, использующей три цветовых сигнала, к схеме активных зеленого и красного и ту роль, которую играют потери времени при трогании l_1 и времени на освобождение перекрестка l_2 .

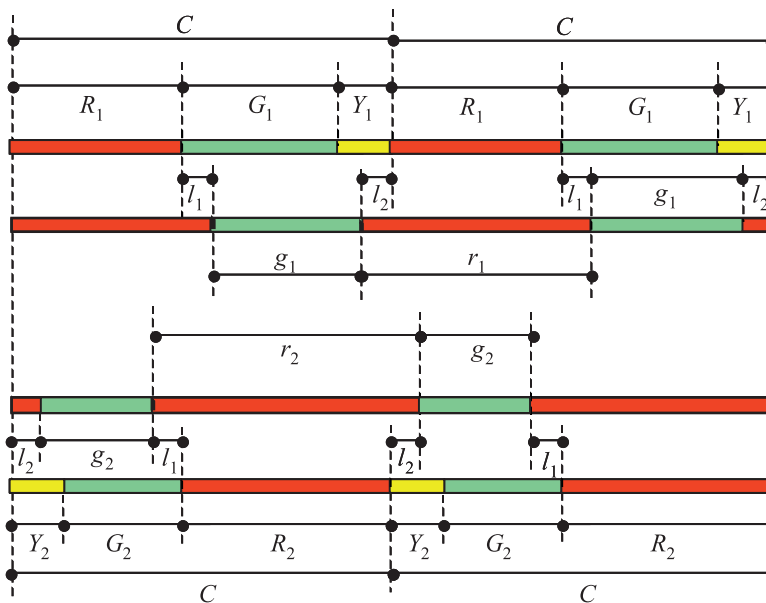


Рис. 180. Схема фазовой настройки светофоров с помощью активных зеленого и красного сигналов, каждый из которых оптимизируется за счет удаления из каждой фазы i потерь времени при трогании l_1 и потерь времени на освобождение перекрестка l_2 , соответственно для зеленого G_i и желтого Y_i сигналов

B7.6.3 Светофорное управление путем выбора плана

Светофорное управление путем выбора плана заключается в оптимизации светофорных параметров для интервалов времени, с учетом того, что в каждом интервале показатели потоков известны и постоянны. В отличие от управления с фиксированным расписанием циклов, в котором светофорные планы рассчитываются на основе ретроспективных данных и привязаны ко времени суток, в светофорном регулировании по выбору плана транспортные потоки рассматриваются и фиксируются системой мониторинга дорожного движения в режиме реального времени. Основываясь на этих замерах, система применяет заранее определенные правила для выбора из недр «хранилища» планов, заранее рассчитанных для ситуаций, признаваемых наиболее сложными и значимыми, и таким образом может быть выбран тот, который лучше всего соответствует условиям реально зафиксированной дорожной обстановки.

Регулирование по выбору плана требует методов классификации конфигураций дорожного движения, которые позволяют различать превалирующие дорожные условия и являются входными данными для логических алгоритмов выбора одного из различных заранее разработанных планов.

Выбор плана регулирования происходит обычно путем оценки сравнительной функции, которая сопоставляет значения переменных движения, полученных с помощью датчиков, показаниями которых система уже владеет, и значения, соответствующие планам регулирования, имеющимся в памяти системы.

Операция сопоставления данных повторяется через интервалы времени, установленные пользователем (как правило, они равняются примерно одной минуте).

Возможны самые разнообразные логические схемы выбора плана различной категории сложности. Одна из систем, наиболее распространенных в Соединенных Штатах, известная как *UTCS (Urban Traffic Control System)* поколения 1.5⁹⁹ использует сравнительную функцию T , определенную для общего плана j как сумма отклонений между зафиксированными показателями интенсивности транспортного потока и его плотности и теми, что соответствуют заранее рассчитанному плану:

$$T_j = \sum_{i=1}^{s_n} W_i (V_i + KO_i - R_{ji}) \quad j=1, \dots, m, \quad (12)$$

где

s_n – количество датчиков;

W_i – весовой коэффициент датчика i ;

V_i – текущее показание интенсивности транспортного потока для датчика i ;

K – весовой коэффициент плотности движения;

O_i – текущее показание плотности движения для датчика i ;

⁹⁹ Название «поколение 1.5» происходит от терминологии, введенной в Соединенных Штатах, чтобы охарактеризовать эволюцию систем регулирования городского автомобильного движения *UTCS (Urban Traffic Control System)*. Использование метода регулирования «по расписанию» свойственно системам первого поколения, или «поколения 1»; к «поколению 2» относятся генерации планов с изменением фазовых смещений и распределением зеленого сигнала, а к «поколению 3» можно отнести системы генерации плана с расчетами в режиме онлайн для всех переменных работы светофоров. Поскольку обновление библиотек планов в автономном режиме (*offline*) является одной из самых серьезных задач, была введена система *UTCS* «поколения 1.5», которая на основе повторяющихся дорожных ситуаций автоматически рассчитывает планы, запоминает их и потом из них выбирает нужный.

R_{ij} – зафиксированные показания объема и плотности движения для датчика i , ассоциированные с каждым планом регулирования J ;

J – количество планов регулирования;

m – общее количество планов регулирования.

В библиотеке заранее рассчитанных планов отбирается план с наименьшим значением функции сравнения. Показатели интенсивности транспортного потока и его плотности могут быть умножены на весовые коэффициенты W больше единицы для придания большего значения данным, полученным от датчиков, установленных в критических точках дорожной сети.

В системе *UTCS* поколения 1.5, во избежание частых перемен планов, переход от текущего плана a к плану j происходит через определенное время, вызванное неизбежной задержкой для необходимой коммутации, лишь в том случае, когда функция сравнения снижается настолько, чтобы сделать антиосциллирующую функцию E положительной:

$$E_j = kT_a - T_j \quad j = 1, \dots, m, \quad (13)$$

где

k – пороговое значение стабилизирующей функции – действительное число, располагающееся между 0 и 1;

T_a – значение функции сравнения текущего плана регулирования;

T_j – значение функции сравнения выбираемого плана регулирования.

На выбор значения параметра k оказывают влияние такие факторы, как количество датчиков на одном участке дороги и значения уровня интенсивности транспортного потока и его плотности. Если количество датчиков увеличить, может увеличиться также значение параметра. Аналогичным образом в случае возрастания интенсивности транспортного потока и его плотности может возрасти и k .

В7.6.4 Идеальное координированное светофорное регулирование

Идеальное координированное светофорное регулирование – это то особое регулирование фазовых рассогласований \mathfrak{F} узлов, которое выполнимо, если предположить следующее:

- все пересечения i находятся на одном и том же расстоянии:

$$l_{ij} = A, \forall i \neq j, i = 1, \dots, n;$$

- отсутствие въездов на основную дорогу и выездов с нее по всей длине участка, из чего следует, что цикл регулирования и длительность зеленого сигнала должны быть одинаковыми для всех узлов:

$$g_j = g_j = b; C_j = C; \forall i, j.$$

В этом случае можно добиться прогресса в условиях движения ТС, которые перемещаются с постоянной скоростью без остановок в узлах пересечений, при условии, что в каждом узле зеленый сигнал светофора включается, когда к нему подъезжает автомобиль из первой группы, и отключается сразу же после прохождения последнего. Данное условие, графически отображенное на рис. 81, требует, чтобы интервал между началом действия разрешающего сигнала на двух узлах автомагистрали (необязательно следующих один за другим) i, j (фазовое рассогласование \mathfrak{F}_{ij}) был равен времени проезда от одного узла к другому:

$$t_{ij} + t_{ji} = \frac{A}{v_1} + \frac{A}{v_2} = mC, \quad m \text{ intero.} \quad (14)$$

Формула (14) устанавливает важную связь между расстоянием между узлами дороги, скоростью движения автомашин (так называемая скорость синхронизации) и длительностью цикла регулирования. Допустив упрощающую гипотезу, что скорости движения в обоих направлениях магистрали равны ($v_1 = v_2 = v$) и рассматривая два смежных узла ($m = 1$), мы видим, что формула (14) становится:

$$t_{ij} + t_{ji} = \frac{A}{v} + \frac{A}{v} = C, \Rightarrow C = \frac{2A}{v}. \tag{15}$$

С этой гипотезой, адаптированной также к схеме на рис. 181, фазовое рассогласование между двумя смежными узлами равняется половине цикла:

$$\vartheta_{i,i+1} = 0,5C \quad (i = 1, 2, \dots, n). \tag{16}$$

Замечания

Выражение (15) подразумевает, что если расстояние между узлами A фиксированное, то при увеличении интенсивности движения по магистрали, а следовательно, при росте продолжительности цикла C необходимо снижать скорость синхронизации v .

Формулируя проблему, необходимо ввести взаимозависимость между экстремальными, нижним и верхним, значениями переменных:

$$\begin{aligned} v_{\min} &\leq v \leq v_{\max} \\ C_{\min} &\leq C \leq C_{\max} \end{aligned} \tag{17}$$

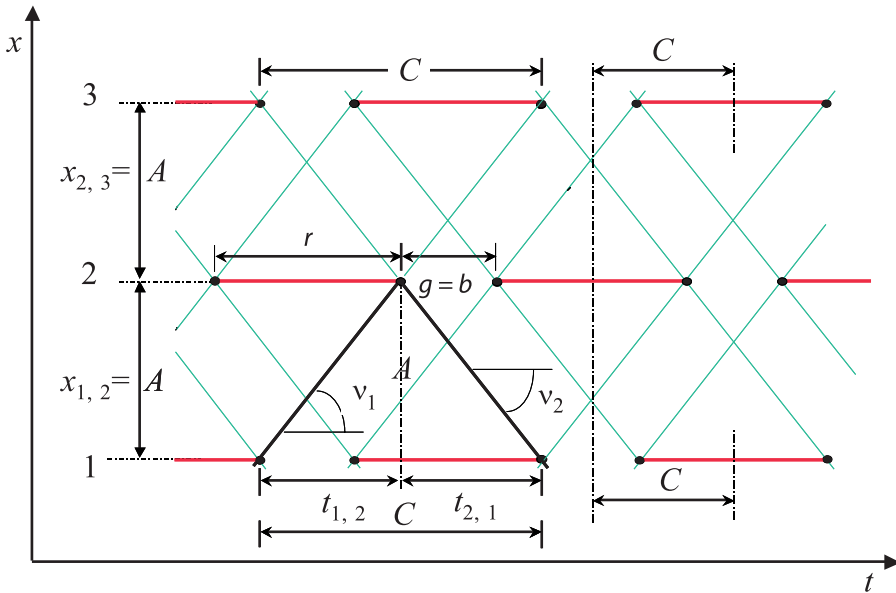


Рис. 181. Схема идеального координированного светофорного регулирования в плане «пространство – время»: в каждом узле зеленый сигнал светофора включается, как только к нему приближается первый автомобиль из группы ТС, и гаснет сразу же после прохождения последнего

Ограничения скорости вводятся по следующим причинам: нижний порог – при необходимости обеспечить минимальный уровень режима, ниже которого координированное регулирование не имело бы смысла. Верхний порог – для

обеспечения условий безопасного проезда автотранспорта. Предназначение нижнего порога цикла – обеспечение соблюдения условий пропускной способности на подъезде к транспортной артерии (включая и боковые дороги), в то время как введение и поддержание верхнего порога ограничений диктуется целесообразностью удерживать включенным запрещающий сигнал светофора в пределах времени терпения пользователей.

Этим последним условием почти никогда не пользуются, поскольку на основе расчетов (15) и (17) максимальный цикл не может превышать значение $C_{\max} = 2A/V_{\min}$. Для расстояний, как правило отделяющих в городе один светофор от другого (от 200 до 500 м), скорость синхронизации 10 м/с (что составляет 36 км/ч) обусловила бы значения максимального цикла соответственно равными 40 и 100 с. Если предположить, что суммарная потеря времени составила бы 10 с, светофорный цикл в 100 с соответствовал бы уровню насыщенности перекрестка ТС, равному 0,90. Это довольно высокий показатель, но все же такая ситуация далека от привычной, с типичными городскими заторами на дорогах в часы пик. Из этого следует, что даже в идеальных условиях, когда расстояния и транспортные потоки одинаковы на всех дорожных узлах, координация с нулевой по времени задержкой была бы возможна в часы наименьшей загруженности дорог и на расстояниях от светофора до светофора свыше 500 м.

В7.6.5 Свойства периодичности и симметрии в схемах координации светофорного регулирования

В рассматриваемых условиях светофорные циклы на разных дорожных узлах одинаковы между собой, следовательно, схема координированного регулирования периодична во времени, поскольку периодически повторяется через каждый цикл C .

Так как соотношение (14) устанавливает связь между периодом времени и постоянным расстоянием между узлами A , которая действительна для каждого целого m , то схема синхронизации еще и периодична в пространстве.

Формула (16) устанавливает, что на смежных узлах действуют чередующиеся фазовые рассогласования. Из этого следует, что если принять за точку отсчета времени середину периода действия включенного красного сигнала на первом узле, то узлы, расположенные на расстоянии, равном кратному нечетному A , находятся в одной фазе с первым узлом, а узлы, расположенные на расстоянии, равном кратному четному A , работают по отношению к нему в противофазе:

$$\begin{aligned} \vartheta_i &= 0 \quad \text{если} \quad \frac{x_i - x_0}{2A} = m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \\ \vartheta_i &= \frac{C}{2} \quad \text{если} \quad \frac{x_i - x_0}{2A} = \frac{2m+1}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \end{aligned} \tag{18}$$

Выражение (18) является решением проблемы идеального координированного регулирования с широкой амплитудой полос восходящей b и нисходящей b' , которые соответствуют общей продолжительности включенного зеленого сигнала.

Исходя из выражений (17) и (18) или просто анализируя рис. 181, можно заключить, что схема координации симметрична относительно A и регулярно воспроизводима в пространстве с периодом, равным $2A$. Поэтому расстояние A между дорожными узлами – это модуль идеального координированного регулирования.

B7.6.6 Формулирование задачи максимальной полосы

Идея полосы зеленого сигнала на графике может быть со всей очевидностью применена и в случае с узлами, имеющими разную продолжительность действия разрешающего сигнала светофора. В этом случае амплитуда полосы будет соответствовать продолжительности самого короткого из зеленых сигналов на автодороге.

В более общем случае узлов, расположенных на произвольном расстоянии друг от друга, еще возможно выстроить полосы зеленого сигнала, но амплитуда полосы будет, как правило, меньше, чем длительность горения самих зеленых сигналов, так как расположение узлов на расстояниях, отличных от модуля, ограничивает полосу даже при равной длительности разрешающих сигналов.

Поэтому проблема заключается в поиске вектора фазовых рассогласований, который смог бы максимизировать ширину полос в двух направлениях движения, при соблюдении связей по длительности цикла, по скоростям и по знакам переменных

$$\max f = (b + b'),$$

при условиях

$$\begin{aligned} b > 0; b' > 0, \\ 0 \leq \vartheta < (\text{задача В}), \\ v_{\min} \leq v \leq v_{\max}, \\ \max_i \{C_{\min,i}\} \leq C \leq C_{\max}, \\ C_{\min,i} = L_i / (1 - \max_h \{y_{i,h}\} - \max_k \{y_{i,k}\}). \end{aligned}$$

Последнее ограничение вводит условие пропускной способности для обычного узла пересечений i .

Заменяя неотрицательную связь $b > 0; b' > 0$ равенством $b = b'$, получаем симметричную задачу максимальной полосы (задача В1).

$$\max f = (b + b'),$$

при условиях

$$\begin{aligned} b = b' > 0 (\text{задача В1}), \\ \vartheta = 0 \text{ или } C/2. \end{aligned}$$

Задача В1 гораздо более легкая, чем задача В, потому что допускает лишь два возможных значения для фазовых рассогласований. В частности, координация пары узлов допускает два возможных решения: 0 или $C/2$, которым будут соответствовать две амплитуды полос, большая из которых и будет решением задачи максимальной полосы.

Можно показать также, насколько задача В имеет *слабо вогнутый* вид, т. е. допускает бесконечное количество «штатных» решений; в то время как задача В1 – *узковогнутая* и поэтому имеет единственное решение. Впрочем, всегда можно, оттолкнувшись от решения задачи В1, прийти к решению задачи В путем простых фазовых смещений на узлах¹⁰⁰.

Поэтому далее мы будем ссылаться на симметричную задачу В1 и для простоты изложения будем выражать периоды действия в единицах цикла. Таким образом, $C = 1$.

¹⁰⁰ Для того чтобы в этом убедиться, попробуйте перенести фазу на одном узле: внутри какого-то предела будет видно, что полоса в одном направлении сокращается, зато полоса в противоположном направлении возрастает на такую же величину. Таким образом, сумма f ширин обеих полос останется неизменной.

Помимо прочего, задача B1 представляет собой тесную аналогию с идеальным координированным регулированием, которое, как мы увидим позже, позволяет выражать каждое решение задачи B1 через эквивалентную идеальную систему, составленную из последовательности бесконечных идеальных узлов с равным ширине полосы длительностью зеленого сигнала, которые расположены на расстоянии A друг от друга.

Рис. 182 дает представление о решении для широкой полосы применительно к реально действующей магистрали.

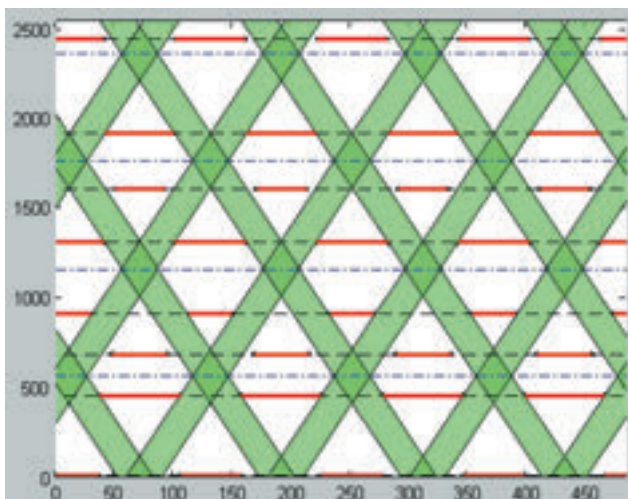


Рис. 182. Отображение «зеленой волны» с точки зрения «пространство – время» применительно к участку автомобильной дороги по виа Тибуртина в Риме

Описание последовательности решения задачи координированного регулирования с «зеленой волной» выходит за рамки той цели, которую преследует рассмотрение этой темы в данной работе. В дальнейшем можно обратиться к исследованию *Papola* и *Fusco* (1998), а прочитать текст в итальянской редакции можно в публикации *Papola* и *Fusco* 1997 г.

B7.6.7 Координированное регулирование с минимизацией отставания

Задача снижения до минимума времени в пути, как было замечено во вступительной части главы, формально может быть выражена следующим образом:

$$t(C, v, g, \vartheta; x, y, s) = \min,$$

причем

$$\begin{aligned} &0 < \vartheta \leq 1, \\ &v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \text{ (задача T)}, \\ &\max_i \{C_{\min,i}\} \leq C \leq C_{\max}, \\ &C_{\min,i} = L_i / (1 - \max_h \{y_{i,h}\} - \max_k \{y_{i,k}\}), \\ &\max_h \{y_{i,h}\} \leq g_i \leq 1 - L_i - \max_k \{y_{i,k}\}. \end{aligned}$$