

Физика длинных линий — путь к «укрощению» DMX

Алексей Битус

Инженеры-инсталляторы и проектировщики осветительных систем и оборудования неоднократно в тех или иных специализированных изданиях обращались к вопросам DMX-управления. Вроде бы все уже понятно, и тем не менее каждый раз возникают спорные моменты. Я попытаюсь на этот раз внести некоторые физические основы, которые, безусловно, гармонично дополнят известные вам «стартовые» представления о DMX-сигнале. Прежде чем углубиться в физику, поясню некоторые «постулаты», аргументирующие необходимость применения именно этой физической модели процесса передачи цифрового сигнала по проводящей среде.

1. DMX-сигнал представляет собой периодические пакеты (кадры) импульсов прямоугольной формы переменной длительности. Форма пакета DMX-сигнала достаточно подробно описана в статьях Г. Агафонова («Шоу-Мастер», 2000, №4 и 2001, №1).

2. Кабель, использующийся при передаче DMX-сигнала, есть электропроводящая среда с конкретными геометрическими и электропроводящими характеристиками.

3. Вся осветительная система — это совокупность интеллектуальных приборов, работающих длительное время в сложных электромагнитных условиях.

4. Вся система управления приборами — это сложная конструкция с множеством электрических соедине-

ний как разъемных, так и неразъемных, т.е. в большинстве случаев надо учитывать возможные «краевые» эффекты.

Сначала определим исследуемый сигнал. Для общего представления физических процессов, происходящих в длинных линиях, достаточно рассмотреть двухполярный прямоугольный периодический сигнал (рис. 1). Надо сказать, что идеальная передача такого сигнала — процесс довольно сложный. Здесь полезно вспомнить Фурье-преобразования. Маленькое отступление. Фурье-анализ позволяет любой сигнал (любой формы, амплитуды и частоты) описать в виде математической последовательности основных характеристических величин с определенными числовыми весами. Каждый весовой коэффициент указывает долю вклада в формирование исследуемой импульсной последовательности элементарного синусоидального сигнала определенной частоты. Иными словами, последовательность любой формы, как из кубиков разной величины, состоит из сложных вместе синусоидальных составляющих.

Математически это выглядит так:

$$F(t) = u_0 + \sum (u_m \sin(m\omega t + \psi_m)),$$

где u_0 — постоянная составляющая ряда (амплитуда сигнала), u_m — амплитуда m -той гармоники ряда (m -той составляющей синусоиды), ψ_m — начальная фаза m -той гармоники, $\omega = 2\pi/T$, где ω — основная частота, T — период функции (сигнала). Например, для разнополярного прямоугольного импульсного сигнала ряд Фурье будет иметь вид:

$$F(t) = \frac{4u_0}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right),$$

где u_0 — амплитуда импульса (рис. 2).

Рассмотрев это математическое выражение, не сложно сделать вывод, что для идеального описания сигнала необходимо как можно больше членов последовательности, т.е. чем длиннее ряд, тем точнее описание сигнала. Безусловно, с ростом номера составляющей уменьшается и ее вклад в форму сигнала, но не следует забывать, что в длинных линиях (нашем кабеле) с увеличением длины возрастает и вероят-

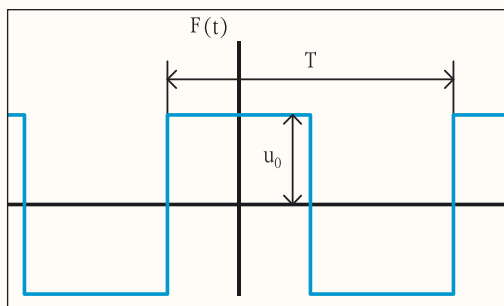


Рис. 1. Двухполярный прямоугольный периодический импульс

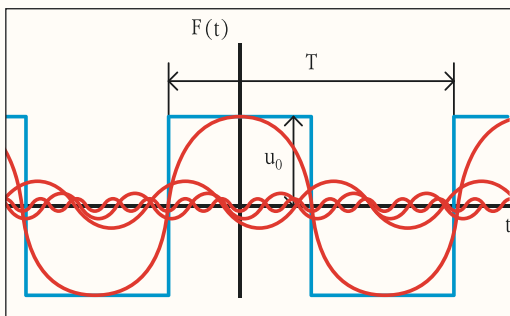


Рис. 2. Фурье-преобразование двухполярного прямоугольного импульса

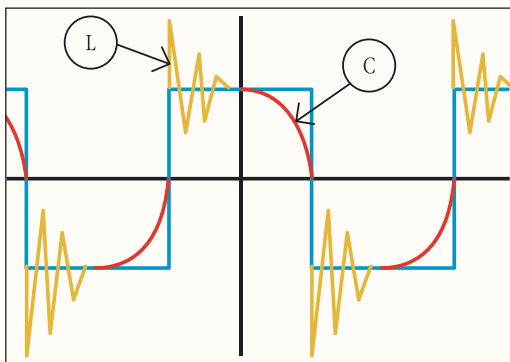


Рис. 3. Искажение прямоугольного импульса

ность искажения формы импульсного сигнала, поэтому значение каждого члена последовательности в формировании пакета может быть весьма ощутимо. Прямоугольность импульса уже не идеальна, кроме того, активное сопротивление проводника увеличивается, уменьшается амплитуда сигнала на приемном конце и соответственно вклад составляющих усиливается. А в смеси с наводками (помехами) сигнал вообще сильно исказится. Это уже справедливо для импульсов достаточно простой формы. DMX-сигнал гораздо более сложный, да еще и от периода к периоду изменчивый в пределах кадра. Математическое выражение будет иным. Общий смысл не изменится, но весовые коэффициенты будут другие. Даже приближенную формулу представить сложно – это задача для компьютерной обработки, слишком много факторов необходимо учесть. Я позволю себе напомнить только тот факт, что максимальная частота обновления информации составляет 5,434 кГц, а минимальная – 4,115 Гц. Амплитуда импульсов не должна быть меньше 0,2 В.

Более подробное описание опустим для упрощения понимания физики процесса передачи.

Далее важно вспомнить следующее:

- искажение прямоугольного импульса может быть по фронту и по спаду;
- на вершине и на спаде импульса могут появляться колебательные процессы или «заваливание» фронтов, это зависит от того, какая нагрузка – индуктивная (L) или емкостная (C) – преобладает в линии (рис. 3), чаще имеют место оба этих параметра (здесь следует вспомнить понятие волнового сопротивления (Z));
- и, конечно же, не стоит забывать о влиянии активного сопротивления кабеля R или проводимости G.

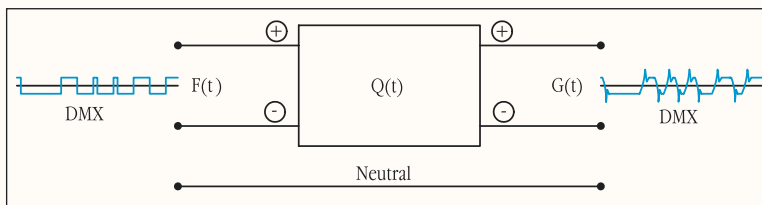


Рис. 4. Линия передачи в виде четырехполюсника:
 $F(t)$ – функция Фурье – образ сигнала DMX;
 $Q(t)$ – функция воздействия длинной линии (четыреполюсника);
 $G(t)$ – результирующая функция (результат внесенных средой искажений)

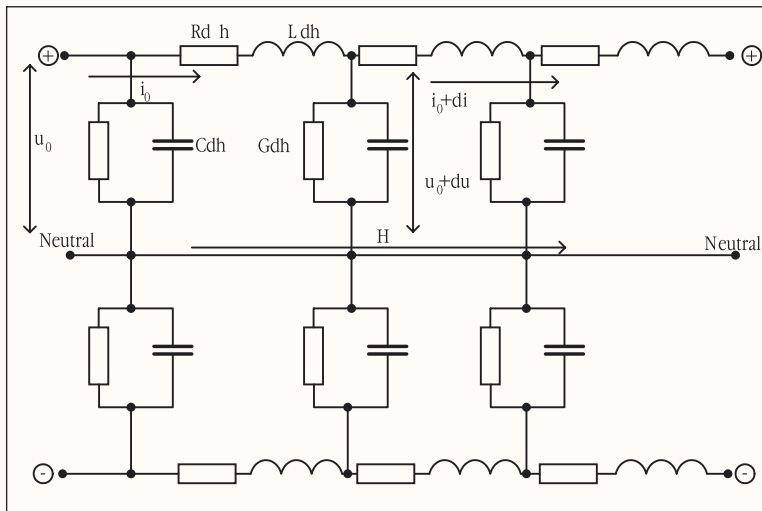


Рис. 5. Схема четырехполюсника – эквивалента данной линии:
 R_{dh} – распределенное по длине H проводника активное сопротивление;
 G_{dh} – распределенная проводимость;
 L_{dh} – распределенная индуктивность;
 C_{dh} – распределенная емкость;
 u_0 и i_0 – амплитуды напряжения и тока;
 u_0+du и i_0+di – приращения напряжения и тока по длине кабеля

В общем случае линию передач можно представить в виде четырехполюсника (рис. 4) с определенными свойствами, зависящими от волнового и активного сопротивления.

Эти величины в свою очередь зависят от состава материала проводников и межпроводникового диэлектрика, конструктивных особенностей кабеля и от способов его включения в передающую сеть. Физически рассматриваемый четырехполюсник – это длинная линия с распределенными параметрами (индуктивностями, емкостями и активными сопротивлениями) по всей длине (рис. 5).

Рассматривая такую модель, мы вполне можем проанализировать физические процессы, которые наверняка происходят в этом случае. Импульсный сигнал в линии, учитывая наши рассуждения, можно представить в виде распространения суммарной совокупности синусоидальных колебаний с разной частотой. Фронты прямоугольных импульсов будут искажаться тем меньше, чем на большей частоте будут оказывать ощутимое влияние распределенные параметры. Это легко понять, рассмотрев формулы:

$$L = \frac{u_m}{i_m \omega}, \quad C = \frac{i_m}{u_m \omega},$$

где u_m и i_m – амплитуды напряжения и тока синусоидального сигнала соответственно, L и C – индуктивность и емкость (распределенные параметры) линии.

Иначе, если представить как

$$\frac{u_m}{i_m} = X,$$

где X – индуктивное сопротивление X_L и емкостное сопротивление X_C ,

выражения можно переписать как

$$X_L = L\omega, \text{ а } X_C = \frac{1}{C\omega},$$

то влияние частоты будет еще наглядней.

Сразу можно определить волновое сопротивление Z_B :

$$Z_B = \sqrt{L/C}, \text{ или } Z_B = \sqrt{X_L X_C}.$$

При распространении сигнала в длинных линиях важно такое понятие, как согласованная и несогласованная нагрузки. Процессы, происходящие в том и другом случае, кардинально отличны.

Согласованной называется нагрузка, если волновое и активное сопротивления линии совпадают, т.е.

$$Z_B = R,$$

в нашем случае (по нормам организации DMX-передачи стандарта EIA485) волновое сопротивление кабеля может быть в пределах от 90 до 120 Ом. Таким образом, если мы нагрузим конец линии активным сопротивлением в этих пределах, то избежим части возможных искажений и, как следствие, ошибок в управлении. Физические процессы, имеющие место в несогласованной линии, т.е. когда

$$Z_B \neq R,$$

это классическое представление волновой теории распространения электромагнитного сигнала в проводниках. Краевые эффекты на конце линии можно сравнить с работой водопроводного крана на конце трубопровода. Может быть три варианта:

- кран почти закрыт – в этом случае вода (а поток воды характеризуется давлением, вязкостью и скоростью) наталкивается на препятствие, появляются отраженные потоки, вызывающие возмущения, которые срывают поток жидкости;
- кран открыт до отказа – в этом случае имеет место эффект резкого изменения (уменьшения) давления потока на выходе, система снова идет вразнос;
- и, наконец, кран открыт нормально, – давление выровнено за счет согласованных сечений трубы и вентиля, поток равномерно вытекает, все спокойно. Это случай согласованной нагрузки.

Подобная ассоциация позволяет довольно наглядно представить процесс, да и вообще все законы природы можно абстрактно представить в виде вполне понятных явлений или в виде математических моделей. Если же говорить языком физики, то на конце длинной линии в разных условиях возникает суперпозиция падающих и отраженных электромагнитных волн, которые очень активно участвуют в формировании сигнала. Есть строгое

математическое описание этих эффектов, с которыми можно ознакомиться в соответствующем разделе ТОО (теоретические основы электротехники).

Вывод же, применительно к нашей проблеме, следующий: основным и обязательным средством борьбы с помехами в линии является согласование линии, т.е. установка так называемого терминатора – сопротивления величиной 90 – 120 Ом между вторым и третьим выводами разъемов.

При выборе номинала очень полезно проанализировать омическое сопротивление кабеля выбранной длины. Опять же, по условиям стандарта EIA485 падение напряжения на всей длине кабеля не должно «убить» амплитуду сигнала меньше уровня 0,2 В. В связи с этим максимальная рекомендуемая длина профессиональных кабелей одной линии может быть не более 1 км.

Поскольку на практике, как правило, DMX-линия располагается в непосредственной близости с токоведущими, довольно мощными (например, диммерными) трассами, то имеют место электромагнитные наводки, влияющие на полезный сигнал. Физика таких наводок очевидна, любой провод при протекании по нему тока образует вокруг себя электромагнитное поле. Последнее, в свою очередь, на определенном расстоянии может наводить поле в соседнем проводнике, которое создает паразитные токи, и искажать сигнал. Борьба с наводками помогают определенные конструктивные особенности самого кабеля. Традиционно сигнальные кабели экранируются пленочной или сетчатой оболочкой, присоединяемой к нулевому проводу питания. Нулевой провод линии должен присоединяться к нулевой точке передающего оборудования, а вот присоединение его к нулю приемника (прибора) вопрос спорный, иногда это может привести к непредсказуемым сбоям. Чтобы правильно произвести подключение, желательно измерить сопротивление между первой точкой разъема и нулевой точкой прибора, если все корпуса приборов (кроме пульта) изолированы от нулевой точки, то все в порядке, в противном случае нужно использовать специальные развязывающие устройства. Обычно такие предосторожности актуальны при использовании длинных кабелей и большого числа приборов. Особенно внимательно надо исследовать заземление, если оборудование рассосредоточено на больших площадях и подведенные точки заземления могут быть в разных местах. Между такими точками, как правило, есть значительная разность потенциалов, что весьма неприятно. Согласно стандарту разность потенциалов между нулевыми точками линий должна быть в пределах от +12 до -7 В. Современные приборы довольно надежно защищены от таких проблем, самый распространенный схемотехнический способ – это оптическая развязка входных цепей приборов. Итак, условие второе: кабель DMX во избежание проблем с заземлением лучше соединять в разъемах без подсоединения корпуса, т.е. первый вывод разъема линии только с первым выводом разъема на приборе.

Подавление электромагнитных наводок успешно реализуется в кабелях с витой парой сигнальных проводов. Поскольку DMX-сигнал разнополярный, то витая пара позволяет скомпенсировать электромагнитные

наводки от соседних источников в двух проводниках. Наводки разного знака складываются и взаимно гасят друг друга. Несложно понять – использование микрофонного кабеля нежелательно по причине существенных конструктивных отличий от кабеля, соответствующего стандарту EIA485. Применяйте только специальный стандартизированный кабель, особенно для организации сложных материалоёмких систем.

Различные, как правило, самодельные разветвители сигнала недопустимы. Они могут ослабить сигнал. Для этих целей существуют специальные усилители-разветвители, так называемые сплиттеры. Их применяют в том случае, когда необходимо направить сигнал по разным трассам или разгрузить громоздкую схему управления.

Имеется еще один вид помех, который встречается реже, но все же требует рассмотрения. Это помехи от радиопередатчиков, например радиомикрофонной или сотовой связи, способные в некоторых случаях вызвать сбой в системе. Все это суть электромагнитные явления. Простым и надежным способом подавления радиопомех является присоединение конденсатора между первым выводом разъема и земляным выводом прибора или передатчика. Величина конденсатора порядка 0,01 мкФ.

Приведем несколько полезных советов. DMX-трассу лучше прокладывать отдельно от токоведущих силовых линий, хотя это и не всегда эстетично. Если уж не избежать прокладки в общем коробе или трубе, то надо по возможности избегать параллельности, укладывая кабель зигзагами или иногда делать транзитные петли. Разъемы следует паять очень аккуратно, так как любой дефект пайки будет «звенеть». Вообще, чем меньше контактов и паек, тем меньше вероятность появления помех. Всякий переход проводниковых сечений – это стресс для сигнала. Нежелательно также паяное удлинение кабеля, припой имеет отличное от основных проводов сопротивление материала и при переходе через такое соединение сигнал неминуемо претерпит изменение, причем не в лучшую сторону.

Аккуратность – залог успеха! Лучше при необходимости удлинить кабель, используя разъемы. К выбору самих разъемов следует подойти «творчески», чем дороже разъем, тем вероятнее его высокое качество, специальные улучшающие добавки в контактные мате-

риалы, удобное конструктивное исполнение обеспечат хорошее электрическое соединение и в сочетании с нормальным кабелем избавят вас от всех описанных выше проблем наверняка.

По большому счету в качестве кабеля можно использовать хоть ПВС (ой, не советую!) или, как «провенный» вариант, микрофонный кабель. Дорогие современные приборы с хорошими входными схематехническими узлами будут как-то работать и с этими вариантами. Но стоит ли экономить на кабеле, если используются дорогие приборы. А с дешевыми «шедеврами» осветительной техники эти варианты гарантированно не пройдут.

Тема передачи DMX-сигнала еще не закрыта, проведено немало исследовательской работы, написано много статей, и все равно всех проблем избежать не удастся, тем более в нашей стране с ее чистыми сетями и «абсолютным» нулем заземления. Цифра – капризная вещь, требующая глубокого понимания процесса формирования сигнала и полноценного анализа электромагнитной обстановки вокруг линии передач. Я тут в одном журнале (не буду называть каком) прочитал, что нужно вообще «долой» DMX и ему подобных, да здравствует аналог. И кто только его придумал, DMX этот. Но так рассуждая, можно вернуться к «первобытному» труду и крутить прожекторы мозолистыми руками сценических рабочих. Прогресс неизбежен, и рано или поздно будет все замечательно и с цифровым управлением. Я, лично, свято верю в это. А для выяснения всех спорных вопросов существует конференция на сайте журнала, в спорах, как известно, рождается истина.

В статье использованы материалы:

Ф.Е. Евдокимов, Теоретические основы электротехники, М., «Высшая школа».

Ф.С. Касаткин, М.В. Немцов, Электротехника, М., «Высшая школа».

Л.А. Бессонов, Электрические цепи, М., «Гардарики».

Большой энциклопедический словарь, физика, главный редактор Ф.М. Прохоров, М., Научное издательство «Большая российская энциклопедия».

Особое спасибо Г. Агафонову и А. Березко за предоставление необходимой для анализа информации по DMX.