

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ В БЕСКАБЕЛЬНЫХ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Лухт А.И., Ропяной А.Ю., Скобло В.З.

ЗАО «НТ-КУРС», Москва

Информация, поступающая с забоя бурящейся скважины, является одним из важнейших факторов, обеспечивающих качественную проводку наклонно-направленных или горизонтальных скважин. Используемые для этих целей телеметрические системы во многом определяют процесс бурения, как в технологическом, так и в экономическом аспектах. Однако, даже наиболее перспективные с этих позиций, телесистемы с электромагнитным каналом связи часто оказываются неэффективны из-за недостаточной технологичности и эксплуатационной надежности, проявляющихся в частых сбоях и отказах, сложности ремонта и обслуживания, больших эксплуатационных расходах.

Серьёзным недостатком бескабельных телесистем, является использование забойного электрического генератора. Этот элемент из-за наличия в нём вращающихся частей (статора и ротора), из-за необходимости герметичного раздела полостей, вывода вращающегося вала из одной полости в другую, причём всё это в условиях высоких давлений, вибраций и температур, в агрессивной и абразивной среде бурового раствора, наиболее ненадежен и недостаточно технологичен. Замена генератора на аккумуляторное электропитание должна привести к качественному росту эффективности телесистемы за счет повышения надёжности, снижения эксплуатационных расходов и трудозатрат. Однако успешный переход на аккумуляторные батареи невозможен без кардинальных изменений в конструкции телесистемы и должен базироваться на новых принципах, технологиях и материалах. В настоящей статье рассмотрены основные (но далеко не все) проблемы, возникшие у ЗАО «НТ-КУРС» в процессе разработки такой телесистемы, показаны возможные пути их решения, которые на наш взгляд представляют интерес для разработчиков и потребителей бескабельных телесистем.

Трансляция информации с забоя скважины на поверхность не по кабелю, а по некоторой физической среде сопровождается затуханием сигнала из-за его отражения и рассеивания. Кроме того, такой канал связи подвержен в значительно большей степени, чем кабель, воздействию помех (или шумов). Поэтому отличительной особенностью бескабельных телесистем является низкий уровень сигнала, поступающего на приёмник, и вместе с тем, высокий уровень шумов. Отношение сигнала к шуму является одной из основных характеристик любой телесистемы, а для бескабельной – увеличение этого отношения является основной проблемой на стадии разработки и зачастую при эксплуатации.

По определению, увеличение отношения сигнал/шум может производиться по крайней мере двумя путями: первый – увеличить амплитуду сигнала на забое и второй – снизить шум в канале связи и на входе приёмника. Очевидный и эффективный путь увеличения амплитуды электромагнитного сигнала связан с энергозатратами, т.е. чем большая мощность может быть направлена на излучение, тем большее значение сигнал/шум может быть достигнуто. С этой точки зрения забойный генератор является основным элементом, обеспечивающим эффективность телесистемы, а увеличение отношения сигнал/шум традиционно было связано в первую очередь с увели-

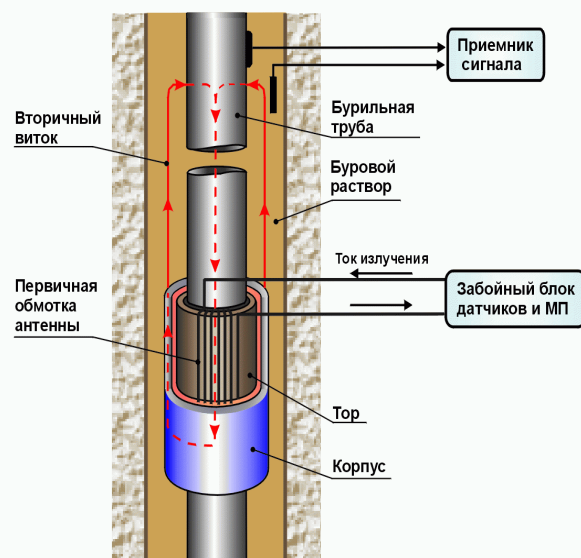


Рис.1. Схема и принцип действия электромагнитной телесистемы.

чением мощности забойного генератора. Поскольку, аккумуляторные батареи могут развивать требуемую мощность только на ограниченном временном интервале, то одна из основных задач разработки телесистемы была посвящена достижению оптимального компромисса между габаритами (аккумуляторов), мощностью излучения и длительностью непрерывной работы на забое (без подзарядки). Проведённый анализ показал, что современные аккумуляторы в достаточно небольшом объёме могут обеспечить длительность работы телесистемы между подзарядками в районе 150-250 часов при скорости передачи информации 5-6 бит/сек., и частоте обновления забойной информации 2-3 раза в минуту, электрическую мощность излучения 1,5-2 Вт. В сравнении с современными генераторными электромагнитными телесистемами, аккумуляторная телесистема должна быть более высокочастотной - частота излучения должна быть порядка сотни Герц, а излучающая антенна должна быть более эффективна. Чтобы обеспечить эти условия была разработана тороидальная излучающая антенна, схема и принцип действия которой показаны на Рис. 1.

Сердечник в виде тора «насажен» на бурильную трубу, которая совместно с корпусом телесистемы образует незамкнутый виток вторичной обмотки тороидального трансформатора. Зазор между корпусом и бурильной трубой заполнен диэлектриком. Переменный ток в первичной обмотке трансформатора наводит в торе переменное магнитное поле и вследствие этого во вторичной обмотке - в незамкнутом витке, возникает электрическое напряжение. Когда телесистема располагается в скважине, заполненной буровым раствором, вторичный виток становится замкнутым и в зазоре течет ток по буровому раствору. Как показали результаты исследования и испытаний, проведённых за последние 5 лет, этот ток, текущий по буровому раствору может быть измерен на устье скважины при помощи приёмной антенны, которая схематично представлена на этом же рисунке. Чтобы увеличить эффективность излучения, тороидальный трансформатор был сделан из материала с очень высокой магнитной проницаемостью – порядка нескольких сотен тысяч.

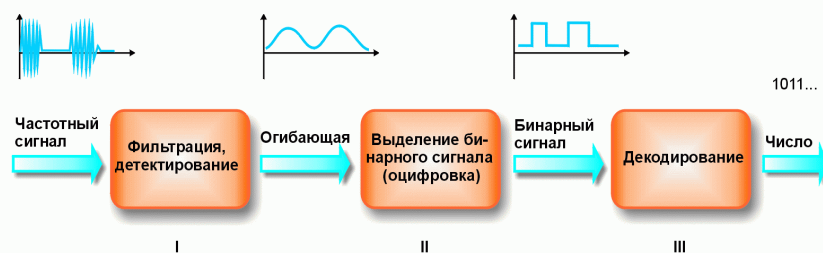


Рис. 2. Функциональная схема приёмника электромагнитного сигнала.

Эксперименты показали, что такая тороидальная антенна полностью обеспечивает требуемые условия по частоте и эффективности излучения, в частности при затратах мощности на излучение около 2-х Ватт, сигнал принимался на поверхности с глубины около 3 км.

Увеличение мощности сигнала на передающей стороне является только одним из методов повышения отношения сигнал/шум. Эта же задача решается и на приёмной стороне при помощи

специальной обработки сигналов. На Рис. 2 показана функциональная схема приёмника электромагнитного сигнала – здесь выделены три основные стадии на каждой из которых специальными методами обработки обеспечивается повышение значения сигнал/шум. На этом же рисунке показаны осциллограммы сигналов на каждой стадии обработки.

Первая стадия – фильтрация аналогового частотного сигнала. Благодаря увеличению частоты излучения, эффективность фильтрации значительно возросла из-за снижения времени потребного для фильтрации. В нашем случае применение узкополосных фильтров, повышающих отношение сигнал/шум не менее чем в 50-100 раз, не снижает скорости передачи информации, которая составляет 5-6 бит/сек.

Вторая стадия – выделение бинарного сигнала, несущего забойную информацию в двоичном коде. Поскольку эта кодировка производится уровнем сигнала, т.е. высокий уровень соответствует значению бита «1», а низкий уровень – значению бита «0», то важнейшей задачей на этом этапе является выбор порогового уровня, выше которого считается «1», а ниже – «0». Проблема заключается в том, что на приёмной стороне заранее неизвестны ни уровень сигнала, ни уровень шума и кроме того, эти уровни могут неконтролируемо изменяться во времени в зависимости от

множества факторов. Вместе с тем, неправильный выбор порогового уровня приводит к ошибкам и сбоям при приёме забойной информации, что эквивалентно снижению значения сигнал/шум.

Разработанная ЗАО «НТ-КУРС» методика определения порогового уровня использует тот факт, что шум (помеха) как и сам сигнал, т.е. последовательность битов «1» и «0» представляют собой случайные процессы и должны описываться статистическими методами. Сигнал, поступающий на вторую стадию обработки анализируется, после чего строится его гистограмма, которая показана на Рис. 3. Возможный диапазон амплитуд разбивается на N поддиапазонов, которые отложены по оси абсцисс, а по оси ординат откладываются число «попаданий» сигнала в данный амплитудный поддиапазон. В пределе, эта гистограмма совпадает с функцией распределения вероятностей входного сигнала. Как видно из Рис. 3 эта функция распределения имеет два выраженных максимума – один из них, соответствующий малой амплитуде – это уровень бита «0» или уровень шума, другой, соответствующий большой амплитуде – это уровень бита «1». Поскольку никаких других амплитуд кроме уровней «0» и «1» в бинарном сигнале нет, то пороговый уровень должен соответствовать минимуму на этой функции. Изменение во времени функции распределения (или гистограммы) приводит к смещению минимума и отслеживая эти изменения производится автоматический выбор и текущая коррекция порогового уровня в процессе приёма сигнала. Экспериментальные исследования показали, что применение этой методики позволяет в 2-3 раза уменьшить число ошибок и сбоев при приёме зашумлённого сигнала.

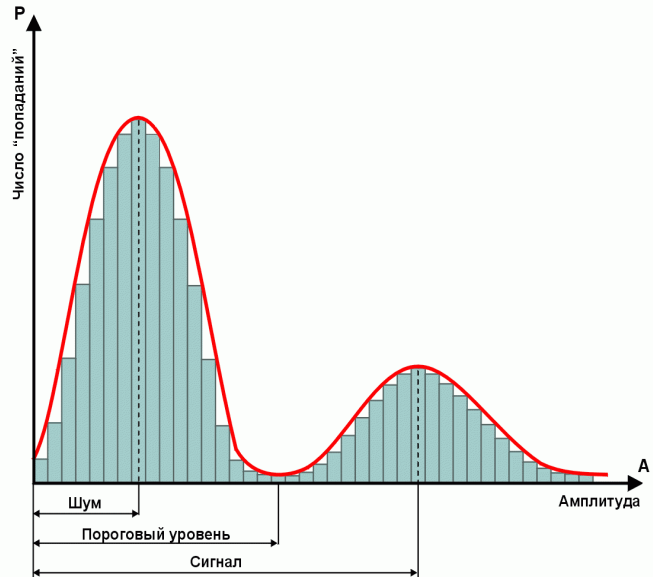


Рис. 3. Гистограмма сигнал + шум и определение порогового уровня.

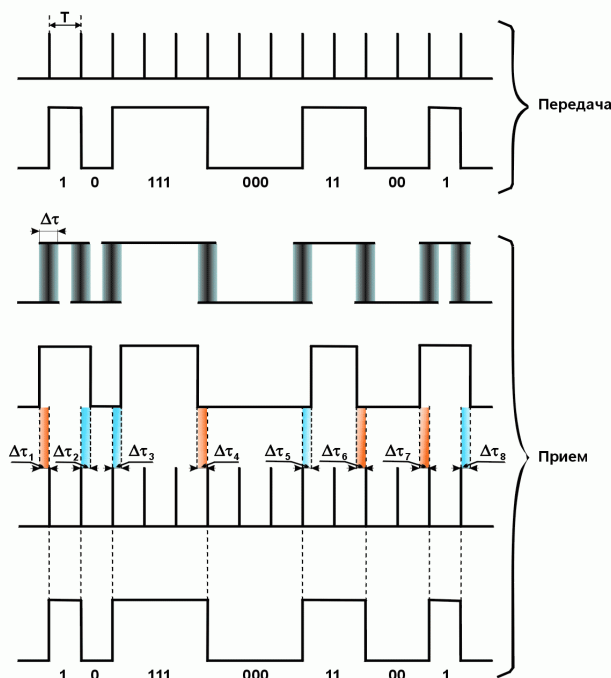


Рис. 4. Декодировка сигнала методом побитного усреднения.

На стадии декодирования бинарного сигнала ошибки и сбои возникают из-за того, что шум в канале связи и на входе приёмника при преобразовании аналогового сигнала в бинарный приводит к изменению длительностей битов «1» и «0». Чтобы снизить влияние шума, обычно используется метод накопления сигнала и его последующее усреднение. В результате такой обработки воздействие шума в силу своей случайной природы, усредняется (сглаживается), а сигнал остаётся без изменений, т.е. отношение сигнал/шум возрастает. Поскольку такой метод усреднения требует повторения сигнала, т.е. его многократного излучения, время трансляции забойной информации кратно увеличивается, что не только снижает оперативность, но при аккумуляторном электропитании совершенно недопустимо из-за дополнительного

расхода мощности на излучение. В связи с этим, был разработан метод побитного усреднения, когда эффект повышения отношения сигнал/шум может быть достигнут при однократном излучении сигнала. Сущность разработанного метода иллюстрируется на Рис. 4. Сравнение длительностей битов «1» и «0» в излученном сигнале с аналогичными длительностями в принятом бинарном сигнале показывает, что они различаются, что и является причиной ошибок и сбоев. Это различие возникает из-за воздействия шума в моменты сравнения уровня сигнала с пороговым уровнем, в результате чего фронты бинарных импульсов, кодирующих биты «1» и «0» могут практически равновероятно располагаться в некотором временном интервале Δt , ширина которого пропорциональна уровню шума. Если шум отсутствует, то $\Delta t = 0$, принятый сигнал повторяет излученный, где фронты бинарных импульсов совпадают с последовательностью меток, длительность между которыми равна длительности одного бита, на Рис. 4 эта величина обозначена T . Обозначая Δt_i - сдвиг во времени i -го фронта бинарного импульса относительно исходной метки, получим, что:

а) Значения Δt_i представляют собой случайную последовательность чисел; разные цвета интервалов Δt_i (см. рис. 4) соответствуют разным знакам этих чисел – часть фронтов «опережает» метки, а часть - «опаздывает».

б) Математическое ожидание (или среднее значение) этой последовательности чисел равно 0.

В принятой бинарной последовательности импульсов анализу подвергаются n фронтов; последовательность меток T сдвигается во времени таким образом, чтобы выполнилось условие

$$\sum_{i=1}^{i=n} \Delta t_i = 0.$$

Нетрудно заметить, что при достаточно большом значении n (практически для $n > 10$) эта последовательность меток, а также скорректированная по ней последовательность фронтов бинарного сигнала будут совпадать с исходными последовательностями, т.е. принятый сигнал будет совпадать с излученным.

Повышение отношения сигнал/шум это лишь часть проблем, которые пришлось решать ЗАО «НТ-КУРС» при разработке электромагнитной телесистемы с аккумуляторным электропитанием. Технические решения, изложенные в настоящей статье, а также ряд других, связанных с кодировкой сигнала, конструкцией телесистемы, её принципа действия и т.д., защищены патентами РФ на изобретения. На Рис. 5 показана фотография разработанной телесистемы; она изготовлена пока только в двух экземплярах и в настоящее время (2004 – 2005гг.) проходит промышленные испытания на скважинах.

