

# Магнитные системы передачи информации.

## Новые решения

**В статье рассматриваются магнитные системы передачи цифровой информации со сверхширокополосной короткоимпульсной несущей (UWB). Показано преимущество данной технологии по сравнению с традиционной узкополосной при построении открытых магнитных каналов связи и организации ферромагнитных каналов телеметрии по тепловодокоммуникациям зданий. Приводятся результаты испытаний экспериментальных моделей магнитных каналов передачи информации в открытой и ферромагнитной среде.**

**Валерий Жижин**  
jjinv@mail.ru

### Введение

Магнитные системы передачи информации (МСПИ) представляются перспективными в системах контроля доступа и идентификации, смарт-картах, платежных системах, а также при организации каналов телеметрии на промышленных предприятиях и объектах ЖКХ (по существующим стальным конструкциям, трубопроводам), поскольку магнитный канал в меньшей степени подвержен влиянию электромагнитных помех, чем RF-каналы, а также использует квазистатичное магнитное поле, не создающее помех другому оборудованию и обеспечивающее энергетическую конфиденциальность передачи информации.

Кроме того, полевые особенности магнитной связи точно предсказуемы и относительно не зависят от свойств окружающей среды.

Появление новых технологий регистрации магнитных полей, таких как магнитные сенсоры на основе феррит-гранатовых пленок и гигантского магниторезистивного эффекта (ГМР), позволит реализовать новые принципы построения беспроводных помехозащищенных систем передачи цифровой информации и телеметрии.

### Немного истории

После открытия в 1840 г. Майклом Фарадеем (Michael Faraday) закона электромагнитной индукции это явление получило широкое применение, главным образом при создании различных электро-механических машин и приборов — начиная от электромагнитных реле и кончая мощными электродвигателями и генераторами.

В 60-е годы прошлого века появились первые устройства передачи информации по магнитному индуктивному каналу. Они нашли применение в качестве автоматических экскурсоводов при организации музейных витрин и при органи-

зации передачи информации на портативный наушник в радиостанциях скрытого ношения. Автоматический экскурсовод на принципе магнитной индукции до недавнего времени успешно функционировал в Политехническом музее Москвы. Системы передачи акустической информации отечественного и импортного производства в радиостанциях скрытого ношения до сих пор находят применение.

В этих каналах передачи информации использовалась прямая амплитудная модуляция магнитного потока в сверхнизкочастотном диапазоне 300–5000 Гц, что обуславливало их низкие эксплуатационные характеристики, связанные со значительной потребляемой мощностью и габаритами передающей и приемной катушек.

Новый всплеск интереса к МСПИ произошел в начале 90-х годов XX в. и был связан с бурным развитием технологий радиочастотной идентификации — RFID. Был разработан и принят ряд международных стандартов по RFID-системам, в том числе и ISO/IEC 14443, регламентирующий требования к магнитным транспондерам и считывателям. В результате развития этого стандарта в начале 2000-х годов появилась система NFC (Near Field Communication, «коммуникация ближнего поля»), которая находит все большее применение в смартфонах, платежных терминалах, электронных охранных устройствах. Отличительными особенностями этих магнитноиндуктивных систем является связь на сверхкороткие расстояния (порядка 20 см) и различные виды узкополосной манипуляции (OOK, BPSK) несущей HF-диапазона 13,56 МГц.

Отдельно следует отметить весьма интересную систему LibertyLink, разработанную в 2005 г. американской фирмой Aura Communications Technology, Inc. [1]. Система использует

расширенную форму магнитной связи и позволяет обеспечить конфиденциальную беспроводную передачу аудио и цифровых данных на короткие (порядка 1 м) расстояния. Конфиденциальность связи достигается за счет локализации магнитного поля в ограниченном пространстве в комбинации с несущей частотой 204 кГц. В качестве приемопередающих элементов используются цилиндрические катушки индуктивности с ферритовыми сердечниками. В настоящее время компания Aura Communications Technology, Inc. пытается вывести технологию LibertyLink на рынок систем контроля доступа, автомобильных и гаражных охранных систем, беспроводных головных гарнитур.

В открытом доступе материалов, посвященных ферромагнитному каналу передачи информации, крайне мало. Автору статьи удалось найти только одну публикацию по данной теме, представляющую практический интерес [2]. В этой работе предлагается использовать стальную трубу магистрального трубопровода в качестве среды передачи модулированного магнитного потока. При этом эквивалентная магнитоэлектрическая схема системы передачи сводится к трансформатору, первичная обмотка которого нагружена на выходной каскад передатчика, а вторичная — на приемник. В описании к патенту приложены результаты экспериментальной проверки этого метода, полученные на трубе длиной 2,5 м с использованием амплитудной манипуляции несущей частоты 50 МГц. Как указывают авторы патента, передаваемая мощность уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния между передающей и приемной катушками.

### Сверхширокополосная связь

Как показывает анализ процессов передачи сигналов по магнитоиндуктивному каналу, ее эффективность определяется тремя факторами:

- производной огибающей или частотой токового сигнала несущей (следствие закона электромагнитной индукции);
- нахождением передатчика в ближнем поле, определяемом как  $\lambda/2\pi$ , где  $\lambda$  — длина волны несущей;
- наличием или отсутствием в среде передачи объектов экранирующих магнитных полей, т. е. обладающих высокой магнитной проницаемостью.

При использовании гармонических колебаний с повышением частоты возрастает потребляемая мощность выходного каскада передатчика, снижается добротность передающей катушки и величина размеров ближнего поля. Поэтому возникла идея использовать в качестве несущей сверхширокополосный сигнал (СШП) — короткоимпульсную последовательность высокой скважности, предположительно свободную от указанных недостатков.

Подобные сигналы уже нашли применение в UWB-системах радиосвязи и моноимпульсной радиолокации [3] на короткие, до 10–15 м, расстояния и показали высокую помехозащищенность, отсутствие многолучевого распространения, хорошее проникновение сквозь металлические элементы строительных конструкций.

Этот тип сигналов позволяет создавать передающие каскады с высоким пикфактором

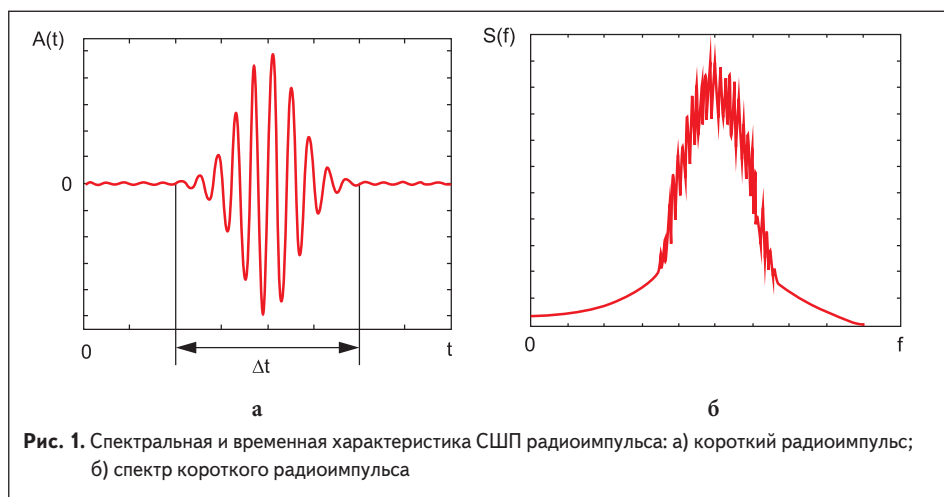


Рис. 1. Спектральная и временная характеристика СШП радиоимпульса: а) короткий радиоимпульс; б) спектр короткого радиоимпульса

(отношение пиковой мощности к средней) и тем самым получить требуемую дальность работы.

Элементы несущей последовательности — короткий радиоимпульс и его спектр — показаны на рис. 1.

Короткий радиоимпульс представляет собой цуг синусоидальных колебаний с колоколообразной огибающей и описывается следующим выражением:

$$I(t) = \exp(-(t-t_{02})/2 \times t_{02}) \times \sin(2\pi \times f_c \times t), \quad (1)$$

где  $t_0$  — характерная длительность огибающей радиоимпульса,  $f_c$  — центральная частота колебаний. Спектр такого сигнала имеет вид:

$$S(f) = \exp(-2 \times (\pi \times (f \pm f_c) \times t_0) \times 2). \quad (2)$$

Сигнал формируется в два этапа. Сначала в низкочастотном диапазоне формируется импульс огибающей длительностью  $t_0$ , имеющий гауссовую форму, затем он перемножается с периодическим несущим сигналом с частотой  $f_c$ . Полученный таким образом сигнал имеет ширину спектра  $F = 1/t_0$  и центральную частоту  $f_c$ .

Из всего многообразия сверхширокополосных сигналов данный вид был выбран исходя из следующих критериев:

- отсутствие в спектре постоянной составляющей, что предотвращает насыщение передающей катушки и снижает потребление передатчика;
- возможность гибкого управления спектром сигнала, изменяя частоту заполнения.

Для исследования магнитных систем передачи информации с использованием технологии СШП несущей были созданы экспериментальные модели МСПИ с открытым и ферромагнитным каналом при скорости передачи информации 10 кбит/с.

### Исследование модели МСПИ с открытым каналом

Эта модель реализует взаимодействие приемника и передатчика через квазистатическое магнитное поле и представляет собой импульсный трансформатор с воздушным сердечником, первичной обмоткой которого является индуктивная рамка, а вторичной — ферритовая антенна с плоским сердечником.

Как было экспериментально установлено, небольшая, 80×60 мм, рамочная антенна предпочтительнее дипольной, так как в ближней зоне ее магнитное поле значительно превышает магнитное поле дипольной антенны.

В эксперименте рамочная индуктивная антенна нагружалась на формирователь последовательности коротких радиоимпульсов длительностью 2 мкс. Частота заполнения изменялась в диапазоне 2–10 МГц. Уход в более низкий диапазон был признан нецелесообразным из-за снижения скорости передачи при сохранении энергопотребления или, при сохранении скорости передачи, из-за резкого возрастания энергопотребления передатчика. Использование более высокочастотного заполнения приведет к выходу из режима ближнего поля (для 10 МГц размер области ближнего поля составляет примерно 4,4 м) и нарушению принципа работы магнитоиндуктивного канала. Формируемые импульсы имели амплитуду 350 В при токе 2 А.

В процессе проведения экспериментов было установлено, что оптимальная частота заполнения импульса составляет примерно 4 МГц. При этом минимальные нелинейные искажения передаваемого сигнала достигаются при значениях индуктивности передающей рамки 15 мкГн, а приемной катушки — 30 мкГн.

Прием сигналов осуществлялся широкополосным приемником с высоким входным импедансом, с последующей полосовой фильтрацией на частоте заполнения СШП импульса и его регенерацией до КМОП-уровня.

Нормированный график зависимости принимаемой амплитуды импульса  $S$  от расстояния  $h$  приведен на рис. 2 и показан красным цветом. Синим цветом показана линия тренда, аппроксимирующая данную зависимость, математическое выражение которой приведено в верхнем углу графика.

Как видно, распространение в свободном пространстве магнитного СШП импульса удовлетворительно описывается экспоненциальным законом.

Эксперимент с открытым магнитоиндуктивным каналом проводился в офисном помещении при наличии в нем металлических шкафов, сейфа и компьютеров и показал устойчивый прием и регистрацию сигналов на расстоянии до 2 м. Отношение сигнал/шум на входе приемника при этом составило 16 дБ.

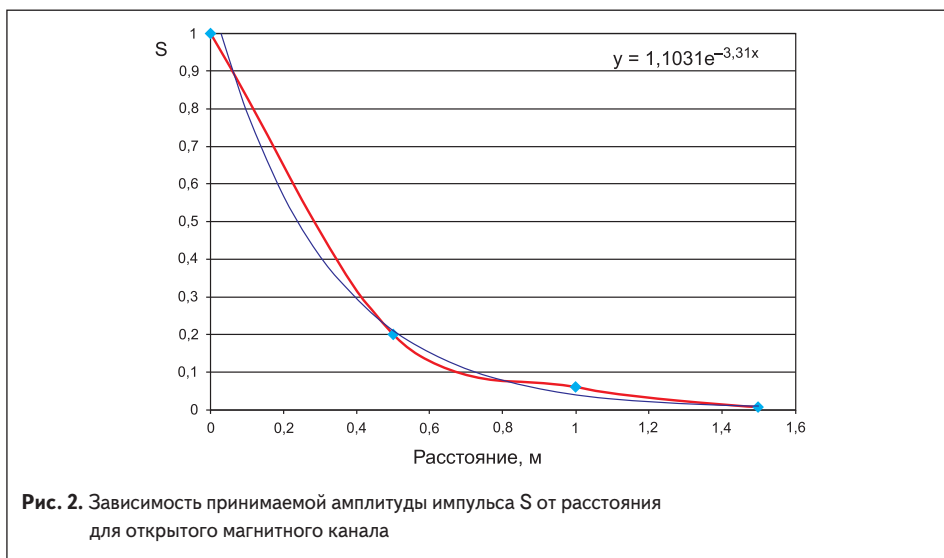


Рис. 2. Зависимость принимаемой амплитуды импульса S от расстояния для открытого магнитного канала

### Исследование модели МСПИ с ферромагнитным каналом

Экспериментальная модель МСПИ с ферромагнитным каналом состоит из участка трубы тепловодоснабжения здания, передающей и приемной катушек, намотанных непосредственно на трубе, и аппаратуры генерации и приема сигналов.

Ввод сигнала в линию связи осуществлялся через входную индуктивность, в которой импульсом тока создавалось импульсное магнитное поле, пригодное для передачи сигнала по ферромагнитной линии связи — магнитной цепи в виде стальной трубы. В месте приема сигнала была расположена выходная индуктивность, на которую действовало дошедшее по стальной трубе магнитное поле. Обе индуктивности (входная и выходная) взаимно индуктивно связаны через ферромагнитную линию связи. В выходной индуктивности переменное магнитное поле создает импульсный электрический сигнал.

Исходя из этого теоретическая модель канала может быть представлена в виде эквивалентного четырехполюсника — трансформатора с раз-

несенными первичной и вторичной обмотками. Эквивалентная схема представлена на рис. 3.

$$M = k_0 \times (L1 \times L2) \times 0,5, \quad (3)$$

где  $k_0$  — коэффициент связи между обмотками;  $G_0 = P_n / U_m$ , где  $P_n$  — суммарная мощность тепловых потерь в магнитопроводе на перемещение и токи Фуко,  $U_m$  — амплитуда сигнала передатчика.

Величина  $P_n$  может быть оценена следующим образом:

$$P_n = P_s \times m \times (f / f_1) \times 2 \times (B / B_1) \times 2, \quad (4)$$

где  $P_s$  — удельные массовые потери;  $m$  — масса фрагмента магнитопровода между передатчиком и приемником;  $f$  — рабочая частота;  $f_1$  — базовая расчетная частота 1 кГц;  $B$  — величина магнитной индукции;  $B_1$  — величина базовой магнитной индукции 1 Тл [4].

Исходя из 1 и 2 закона Кирхгофа и учитывая, что ток в ветви  $L2R2 \ll$  тока через  $M$ , получим приближенное решение для выходного сигнала:

$$U_2 = I_{1m} \times M \times 2\pi f_c \times \exp(-(t-t_0)/2) / 2t_{02} \times \cos(2\pi f_c t), \quad (5)$$

где  $I_{1m}$  — амплитуда токового импульса в передающей обмотке.

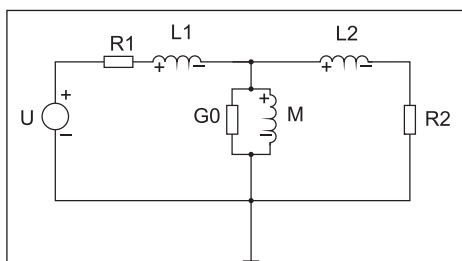


Рис. 3. Эквивалентная схема ферромагнитного канала передачи информации: U — источник сигнала; R1 — суммарное сопротивление потерь источника сигнала и передающей катушки; L1, L2 — входная и выходная индуктивности, соответственно — выходная индуктивность; M — взаимная индуктивность; G0 — проводимость активных потерь в магнитопроводе; R2 — сопротивление нагрузки приемника

Формула (5) показывает, что эффективность передачи сигнала определяется взаимной индукцией  $M$ , которая линейно зависит от коэффициента связи  $k_0$  между катушками. Зависимости коэффициента связи для различных типов магнитопроводов приведены в [4].

Энергетическое уравнение ферромагнитного канала передачи информации имеет следующий вид:

$$P_{пр}(\text{дБ}) = 10 \times \text{Log}(P_0) - 10 \times \text{Log}(1/k_0) - 10 \times \text{Log}(P_n), \quad (6)$$

где  $P_0$  — мощность передаваемого сигнала, Вт.

В исследуемой модели ферромагнитного канала частота заполнения короткого радиоимпульса выбиралась исходя из помеховой обстановки в канале (в диапазоне примерно до 2 МГц наблюдались хаотические импульсные помехи от компьютеров, сервера, средств оргтехники) и ограничений по повышению частоты исходя из роста потерь (4). В эксперименте частота заполнения составила 3,5 МГц при длительности импульса 2 мкс. Амплитуда токового импульса составляла 2,5 А.

Для согласования АЧХ канала со спектром сигнала передатчика индуктивность передающей и приемной катушек была выбрана 20 мкГн. Катушки были намотаны на трубе теплоснабжения диаметром 100 мм, выполненной из материала СТ-3, и содержали по 35 витков медного провода диаметром 0,5 мм. Для снижения эффектов рассеяния магнитного поля и воздействия промышленных и радиопомех катушки заключались в экран, выполненный из медной фольги толщиной 0,5 мм. При проведении исследований расстояние между передающей и приемной катушками варьировалось в диапазоне 0–5 м.

Нормированные графики зависимости амплитуды принимаемого сигнала от расстояния приведены на рис. 4. Фиолетовой линией показана сплайн-интерполяция измеренной характеристики распространения. Представленный график показывает, что в МСПИ с ферромагнитным сердечником и использованием СШП импульсной несущей распространение магнитного сигнала подчиняется экспоненциальному закону. Регистрируемый сигнал и его спектр приведены на рис. 5.

Как показали предварительные теоретические расчеты, быстрое затухание амплитуды импуль-

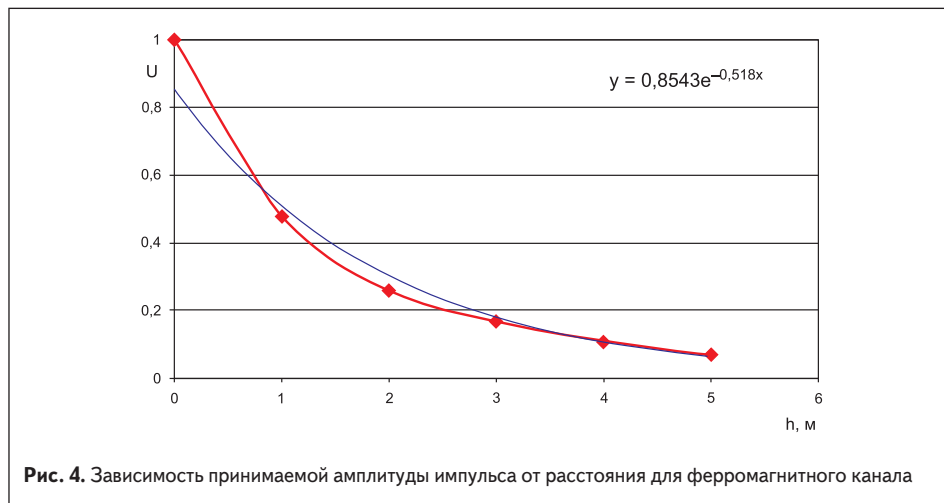


Рис. 4. Зависимость принимаемой амплитуды импульса от расстояния для ферромагнитного канала

са передаваемого сигнала в данных системах может быть преодолено за счет применения импульсных последовательностей большой (100–150) скважности с высокой пиковой мощностью — 300–400 Вт в импульсе. При этом может быть достигнута дальность передачи без ретранслятора порядка 100 м.

Испытания модели ферромагнитного канала выявили и ряд недостатков. К ним относятся следующие:

- относительная трудность реализации приемной экранированной катушки на трубопроводной системе с заданными параметрами;
- критично влияние зазора между обмоткой и магнитопроводом.

С целью минимизации этих факторов было предложено следующее техническое решение: передающая магнитная система должна выполняться на катушке с ферритовой вставкой с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_1$  не менее 600, а приемная должна состоять из П-образного ферритового магнитопровода (магнитная проницаемость  $\mu_2$  порядка 1000), конструктивно связанного с трубой, в поперечном зазоре которого размещается высокочувствительный датчик магнитного поля. В этом случае для магнитной цепи, образованной этими элементами, справедливо уравнение:

$$I_{1m} \times n_1 = H_1 \times z_1 + H_T \times h + H_2 \times z_2, \quad (7)$$

где:  $I_{1m}$  — амплитуда токового импульса в передающей обмотке;  $n_1$  — количество витков

Таблица. Основные результаты исследований экспериментальных моделей МСПИ

Характеристики СШП-сигнала	Вид МСПИ	
	С открытым каналом	С ферромагнитным каналом
Амплитуда импульса, В	350	300
Ток в импульсе, А	2	2,5
Длительность импульса, мкс	2	2
Частота заполнения	4	3,5
Амплитуда импульса вх. сигнала на $h = 1$ м, В	0,05	105
Макс. дальность передачи, м	2	до 100

передающей катушки;  $H_1$  — напряженность магнитного поля передающей катушки;  $H_T$  — напряженность магнитного поля в магнитопроводе трубы;  $H_2$  — напряженность магнитного поля в приемном магнитопроводе;  $z_1$  — длина намотки в передающей катушке;  $z_2$  — длина приемного магнитопровода;  $h$  — расстояние между передающей и приемной системами.

Магнитная индукция  $B$  и напряженность магнитного поля  $H_1$  связаны соотношением:

$$B = \mu_0 \times \mu_1 \times H_1 \quad (8),$$

где  $\mu_1$  — относительная магнитная проницаемость соответствующей среды.

Решая уравнение (7) с учетом (8) и принимая  $\mu_r \ll \mu_1$ ,  $\mu_r \ll \mu_2$ , ( $\mu_r = 150 \dots 220$  для сталей водопроводных труб), получим в плоскости приемного датчика:

$$B = \mu_0 \times \mu_r \times I_{1m} \times n / h \quad (9).$$

Для  $I_{1m} = 2,5$  А,  $n = 35$ ,  $\mu_r = 200$  в приемном магнитопроводе на расстоянии  $h = 100$  м получим  $B \sim 250$  мкТл (0,9 Эрстед, [Э]) без учета потерь.

Для регистрации магнитного поля можно использовать аналоговые ГМР-датчики АА002–АА005 фирмы NVE, имеющие чувствительность порядка 3 мВ/(В·Э) в линейном диапазоне  $\pm 20$  Э. Датчики выполнены по мостовой схеме и требуют наличия измерительного операционного усилителя [5].

Расчеты показывают, что при питании моста напряжением 5 В выходной сигнал датчика составит порядка 14 мВ. В настоящее время идет доработка экспериментальной модели для проверки данного принципа приема сигналов.

Основные результаты исследований экспериментальных моделей МСПИ с открытым и ферромагнитным каналом приведены в таблице.

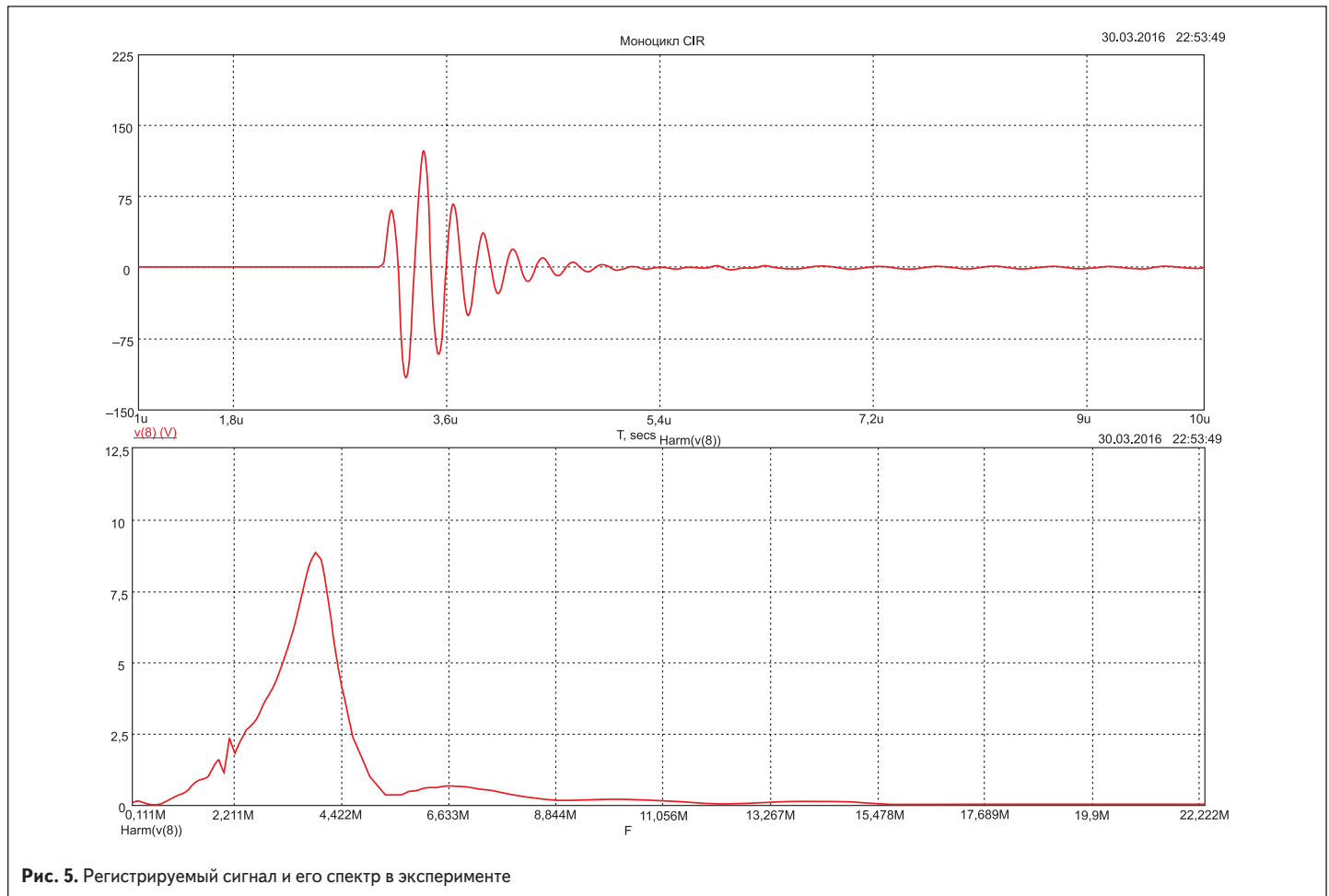


Рис. 5. Регистрируемый сигнал и его спектр в эксперименте

## Протокол и модуляция

В системе цифровой телеметрии по ферромагнитному каналу целесообразно использовать протокол RS-232 с ограничением по скорости передачи до 9600 бит/с и предварительным корректирующим кодированием передаваемого цифрового потока. Виды канальной модуляции — NRZ, Манчестер, код Миллера.

На физическом уровне с учетом характера импульсной СШП несущей целесообразно применить бинарную позиционно-импульсную модуляцию, при которой каждая элементарная посылка передается временным сдвигом положения импульса относительно опорных точек. При этом при передаче «1» сдвиг опережает опорную точку (отрицательный), а при передаче «0» — отстает (положительный).

Для повышения помехоустойчивости и реализации оптимального приема посылка может включать в себя пачку импульсов одинакового

знака сдвига с последующим их когерентным накоплением.

## Заключение

Исследования экспериментальной модели ферромагнитного канала передачи информации со сверхширокополосной импульсной несущей показали, что на основе этого принципа могут быть созданы помехозащищенные малопотребляющие системы телеметрии и сбора данных, например для объектов ЖКХ, в частности для передачи информации о состоянии квартирных водосчетчиков на диспетчерский пункт, расположенный в том же здании и связанный с потребителями данной информации обычным интернет-каналом.

В настоящее время проводятся исследования по следующим направлениям:

- оптимизация приемной магнитной системы;
- схемотехника передатчика и приемника;

- выбор оптимальных алгоритмов приема СШП-сигналов с учетом специфики среды передачи информации.

В 2016 г. на МСПИ с использованием СШП импульсной несущей была подана заявка на полезную модель. ■

## Литература

1. Добрусенко С. Конфиденциальная беспроводная цифровая магнитная связь на короткие расстояния. [www.telemultimedia.ru/](http://www.telemultimedia.ru/)
2. Пат. 2205513 (РФ) Н04В13/00. Способ передачи информации. 27.05.2003.
3. Дмитриев В. Технология передачи информации с использованием сверхширокополосных сигналов UWB // Компоненты и технологии. 2009. № 3.
4. Варламов В. Краткий справочник конструктора РЭА. М.: «Советское радио», 1972.
5. Касаткин С., Муравьев А. Тонкопленочные магниторезистивные датчики // Электронные компоненты. 2003. № 3.