

Технология NFMI и ферромагнитный канал

В статье рассматривается возможность применения в ферромагнитной среде NFMI — беспроводной технологии магнитной индукции ближнего поля. Описаны основные принципы организации и особенности характеристик магнитного канала передачи информации для данного метода. Сделан акцент на использование в качестве ферромагнитного канала передачи информации труб системы тепло- и водоснабжения. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных оценок характеристик NFMI-канала.

Валерий Жижин

Введение

В настоящее время в беспроводных системах малого радиуса действия набирает популярность технология NFMI (Near Field Magnetic Induction — магнитная индукция ближнего поля) [1], разработанная китайской компанией Cannice Technology. Интерес разработчиков систем малого радиуса действия к этой технологии связан прежде всего с тем, что она позволяет создавать локализованный в пространстве малопотребляющий канал передачи данных с высокой пропускной способностью.

Существенным недостатком технологии NFMI в ее современном представлении остается ограниченная дальность передачи сигналов в свободном пространстве, которая составляет порядка 1 м.

Возможно ли, не меняя спецификаций NFMI, повысить ее дальность?

В журнале «Беспроводные технологии» № 2'2019 автором опубликована статья «Магнитоиндуктивные системы передачи информации: перспективы применения в телеметрии», в которой описаны основные принципы организации низкоскоростных систем передачи информации по магнитоиндуктивному каналу с использованием ферромагнитной среды, а также перспективы применения подобных систем в промышленной телеметрии.

В предлагаемой статье рассматривается возможность симбиоза технологии NFMI и ферромагнитного канала (ФМК) с целью повышения ее дальности и создания недорогой системы телеметрии на основе уже имеющейся технологии.

NFMI совместно с ФМК может найти применение при организации низкоскоростных сенсорных сетей малого радиуса действия, связи между устройствами в системах «умный дом», при применении ретрансляторов в автоматизированных системах сбора данных со счетчиков ресурсов, организации каналов связи различных уровней в угледобывающих шахтах.

Особенности характеристик NFMI-канала

Технология NFMI использует магнитную индукцию ближнего поля. Для этого

применяются две катушки индуктивности, которые передают цифровую информацию модулированным магнитным потоком. В качестве несущей используется гармоническое колебание в диапазоне частот, ограниченном полосой 3–15 МГц.

Основные достоинства NFMI:

- возможность формирования направленного поля для передачи сигналов;
- высокая помехозащищенность;
- высокая электромагнитная совместимость с другими передающими устройствами вследствие направленности магнитного поля;
- работа в нелицензируемом диапазоне частот.

В настоящее время выпускается комплект микросхем NxH2280 от компании NXP, реализующий технологию NFMI в свободном пространстве и применяемый в основном в беспроводных наушниках и аппаратах для слабослышащих.

При размещении катушек в свободном пространстве передаваемый магнитный поток в классической технологии NFMI быстро спадает из-за рассеяния.

Для преодоления этого недостатка при передаче магнитного потока предлагается использовать ферромагнитный канал.

Передающая и приемная катушки соосно размещаются на конструкции, выполненной из ферромагнитного материала, например стального трубопровода. Катушки наматываются непосредственно на трубопровод и могут быть выполнены из гибкой алюминиевой или медной ленты, применяемой для экранирования. Данный тип ленты обладает очень малым удельным сопротивлением и достаточно технологичен в использовании.

Для уменьшения потерь при вводе и выводе магнитного потока необходимо минимизировать величину зазора между обмоткой и поверхностью магнитопровода. Для решения данной задачи оптимальна гибкая лента на клеевой основе.

При распространении магнитного потока в магнитопроводе существенную роль играют такие характеристики, как относительная

магнитная проницаемость материала магнитопровода и его геометрия. В совокупности эти факторы оказывают фокусирующее воздействие на передаваемый магнитный поток.

Получим выражение для оценки сигнала на приемном конце NFMI-канала, использующего магнитопровод.

Как показано в работе [2], индукция магнитного поля на оси соленоида описывается формулой:

$$B(t) = \mu_0 \times \mu \times N_1 \times I(t) \times S / 2 \times (R^2 + z^2)^{3/2}, \quad (1)$$

где: $\mu_0 = 12,56 \times 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость среды магнитопровода; N_1 — количество витков передающей катушки; $I(t)$ — ток в катушке; S — площадь витка передающей катушки; z — расстояние от плоскости витка до точки, в которой рассчитывается индукция поля; R — радиус витка.

При $z \gg R$:

$$B(t) = \mu_0 \times \mu \times N_1 \times I(t) \times S / (2 \times z^3). \quad (2)$$

Поток взаимной индукции Φ_{12} между двумя катушками площадью поперечного сечения S равен:

$$\Phi_{12}(t) = B(t) \times S, \quad (3)$$

Изменение этого потока индуцирует напряжение во второй катушке амплитудой:

$$V_{12} = -N_2 \times (d\Phi_{12}(t) / dt) = -2 \times \pi \times f \times N_2 \times \Phi_{m12}, \quad (4)$$

где: f — частота несущей; N_2 — число витков катушки; Φ_m — амплитуда магнитного потока.

Напряжение во второй катушке генерирует ток $I_2(t)$, и, согласно закону самоиндукции, на ней возникает ЭДС самоиндукции амплитудой:

$$V_{22} = -L_2 \times (dI_2(t) / dt) = 2 \times \pi \times f \times L_2 \times I_{2m}, \quad (5)$$

где: L_2 — собственная индуктивность второй катушки; I_{2m} — амплитуда наведенного тока.

С учетом сопротивления потерь на второй катушке R_2 результирующая амплитуда напряжения выходного сигнала:

$$V_2 = V_{12} - V_{22} - I_{2m} \times R_2$$

или

$$V_2 = 2 \times \pi \times f \times N_2 \times B_m \times S - I_{2m} \times (2 \times \pi \times f \times L_2 + R_2). \quad (6)$$

С учетом выражения (2), высокого входного импеданса приемного усилителя и малого значения R_2 получим:

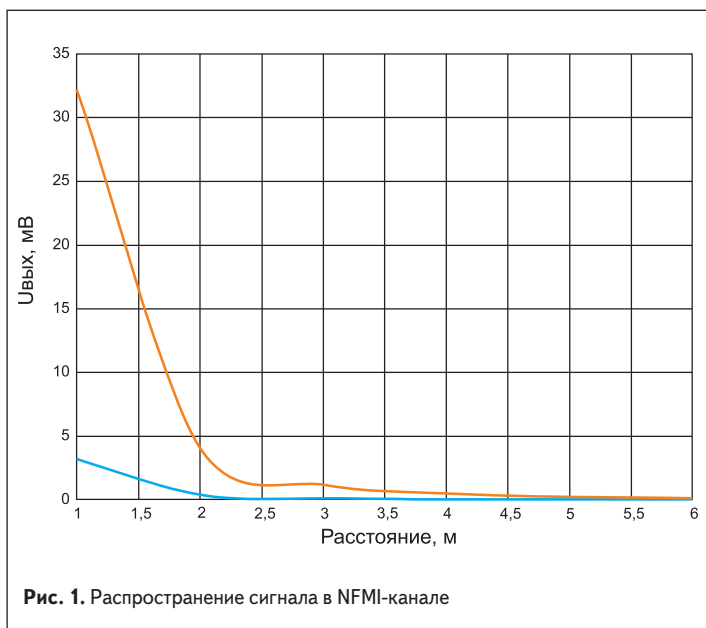


Рис. 1. Распространение сигнала в NFMI-канале

$$V_2 = \mu_0 \times \mu \times 2 \times \pi \times f \times N_2 \times N_1 \times S^2 \times I_{1m} / (2 \times z^3), \quad (7)$$

где I_{1m} — амплитуда тока в передающей катушке.

В магнитопроводе, образованном стальной трубой, практически весь передаваемый магнитный поток сконцентрирован в области, определяемой толщиной ее стенок, поэтому параметр S в выражении (7) определяется площадью кольца поперечного сечения трубы. Данная площадь, определяемая внешним R и внутренним r радиусами, находится по формуле:

$$S = \pi \times (R^2 - r^2). \quad (8)$$

Экспериментальное исследование характеристик передачи сигналов

Для подтверждения возможности использования трубопровода в качестве магнитопровода в NFMI-канале и сравнительной оценки его характеристик с открытым индуктивным каналом были проведены экспериментальные исследования.

В качестве среды передачи при измерениях выбран отрезок стандартной водопроводной трубы, выполненной из стали марки СТ-3 внешним радиусом $R = 24$ мм и внутренним радиусом $r = 20,5$ мм. Площадь поперечного сечения области распространения магнитного потока составила $5,5$ см². Длина отрезка трубы равна 5 м.

Передающая и приемная катушки наматывались на трубу и содержали по 30 витков медного плоского провода, выполненного из медной ленты с акриловым клеящим слоем. Толщина ленты составила $0,05$ мм при длине намотки 35 мм.

При выполнении измерений приемная катушка размещалась относительно передающей с дискретом 1 м. Измерения проводились на гармоническом тест-сигнале переменного тока амплитудой 100 мА и частотой 10 МГц.

Как известно из теории распространения электромагнитных волн, зона индукции ограничивается расстоянием, равным $\lambda/2\pi$, где λ — длина волны передаваемого сигнала.

При указанной частоте сигнала размер зоны индукции составляет 30 м, превышающий длину трубы, поэтому его распространение носит чисто индуктивный характер. Закон распространения магнитного потока должен соответствовать выражению (7).

При измерениях характеристики передачи на открытом NFMI-канале передающая и приемная катушки наматывались на стальных сердечниках площадью сечения, примерно равной площади области распространения магнитного потока в трубе. Измерительный сигнал, тип и материал намотки катушек были идентичны предыдущему.

Результаты проведенных измерений представлены на графиках, изображенных на рис. 1 и 2.

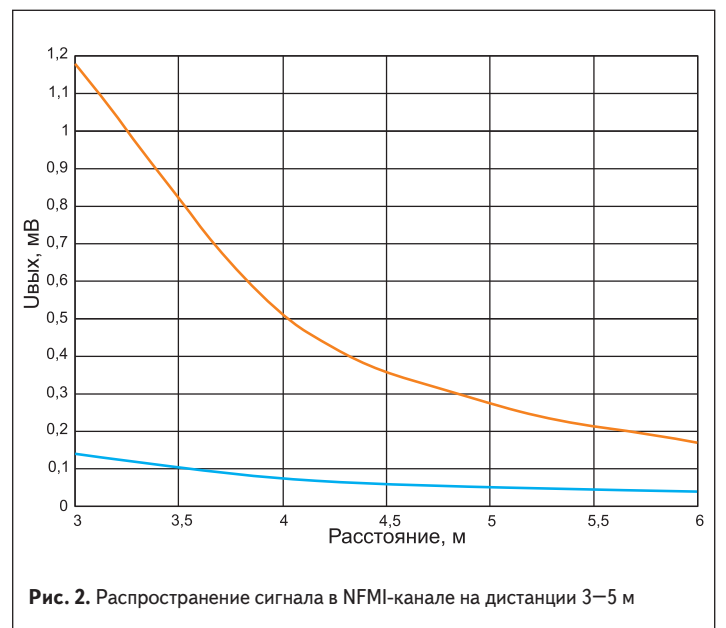


Рис. 2. Распространение сигнала в NFMI-канале на дистанции 3–5 м

Графики, показанные на рис. 1, отражают закон изменения принятого сигнала с катушки в открытом NFM1-канале (график синего цвета) и в канале с магнитопроводом, образованным трубой (график оранжевого цвета).

Анализ полученных данных показывает, что распространение магнитного потока как в магнитопроводе (ферромагнитном канале), так и в свободном пространстве происходит обратно пропорционально кубу расстояния, что подтверждает выражение (7).

Вместе с тем из графиков видно, что эффективность передачи сигнала в ферромагнитном канале выше, чем в свободном пространстве. Это объясняется фокусирующими магнитными свойствами материала трубы. Относительная магнитная проницаемость стали СТ-3 составляет примерно 300.

Графики, показанные на рис. 2, более детально показывают распространение магнитного потока на дистанциях, представляющих практический интерес.

Исходя из анализа полученных результатов измерений можно сделать вывод о необходимости использования ферромагнитного канала в NFM1-системах, если это возможно по конструктивным и технико-экономическим показателям.

Оценка потерь распространения сигнала в ФМК

При распространении сигнала в ФМК возникают следующие виды потерь:

- потери магнитного потока;
- потери на излучение.

Переменный магнитный поток, пронизывающий материал магнитопровода, вызывает появление в массе материала потери на тепловые токи (токи Фуко) и потери, связанные с перемагничиванием (гистерезис) сердечника, в котором распространяется магнитный поток. Методика расчета этих видов потерь широко известна и достаточно хорошо описана в работе [3].

Формула для расчета интегральных потерь в магнитопроводе [3] имеет вид:

$$P_{\text{п}} = P_s \times m \times (f/f_1)^2 (B/B_1)^2, \tag{9}$$

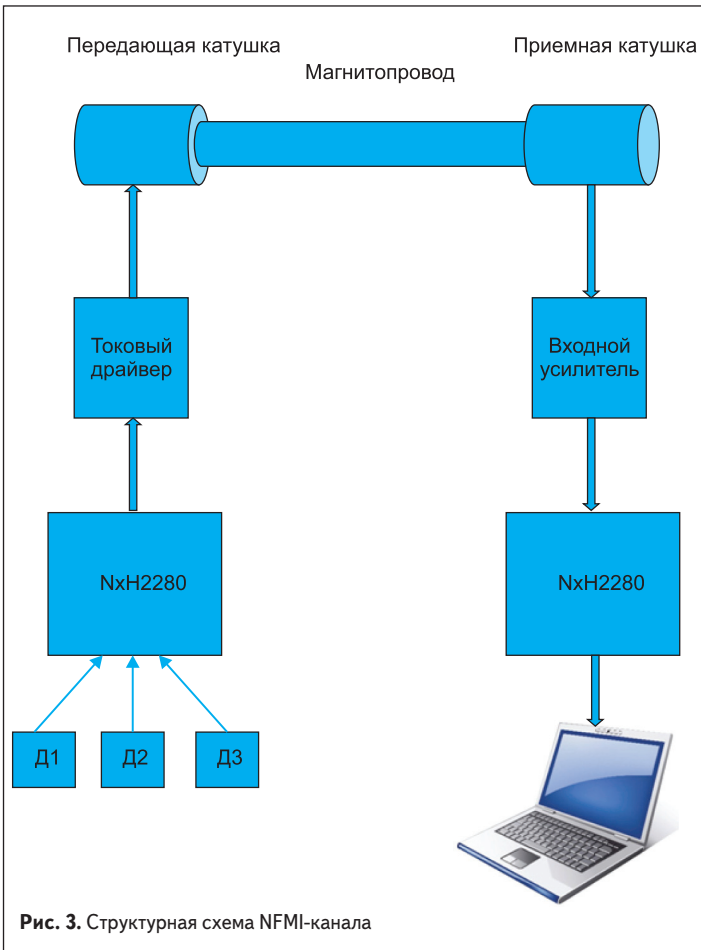


Рис. 3. Структурная схема NFM1-канала

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 — средняя величина магнитной индукции в магнитопроводе; B_1 — величина базовой магнитной индукции 1 Тл.

Потери на излучение связаны с тем, что среда распространения, например отрезок трубопровода, представляет собой излучающую антенну, эффективность излучения которой зависит от многих факторов, но, главным образом, от отношения длины металлической конструкции к длине волны передаваемого сигнала. При увеличении частоты сигнала потери на излучение возрастают пропорционально значению частоты.

С учетом приведенных факторов можно сделать следующий вывод. При проектировании NFM1-системы с ферромагнитным каналом частота несущей должна быть выбрана минимально необходимой для решения конкретной задачи передачи информации, требуемой дистанции и обеспечения помехозащищенности.

Следует отметить также, что графики, представленные на рис. 1 и 2, учитывают все виды потерь распространения сигнала в ФМК при проведении измерений.

Структура NFM1-канала с магнитопроводом

Исходя из вышесказанного можно предложить следующую конфигурацию ферромагнитного канала, например, для системы сбора данных с удаленных датчиков.

На схеме, показанной на рис. 3, приемопередающий модуль на основе микросхемы NxB2280 подключен к схеме токового драйвера, нагруженной на передающую катушку. Через различные коммуникационные интерфейсы к приемопередающему модулю могут быть подключены датчики Д.

Приемная катушка подключается к усилителю, имеющему высокоимпедансный вход, выход которого соединен с приемопередающим модулем, аналогичным модулю передатчика.

Приемная и передающая катушки располагаются на магнитопроводе из ферромагнитного материала.

Токовый драйвер может быть выполнен в виде мостового преобразователя напряжения или регулируемого источника тока на операционном усилителе. Анализ и расчет схем подобных устройств подробно изложен в работе [4].

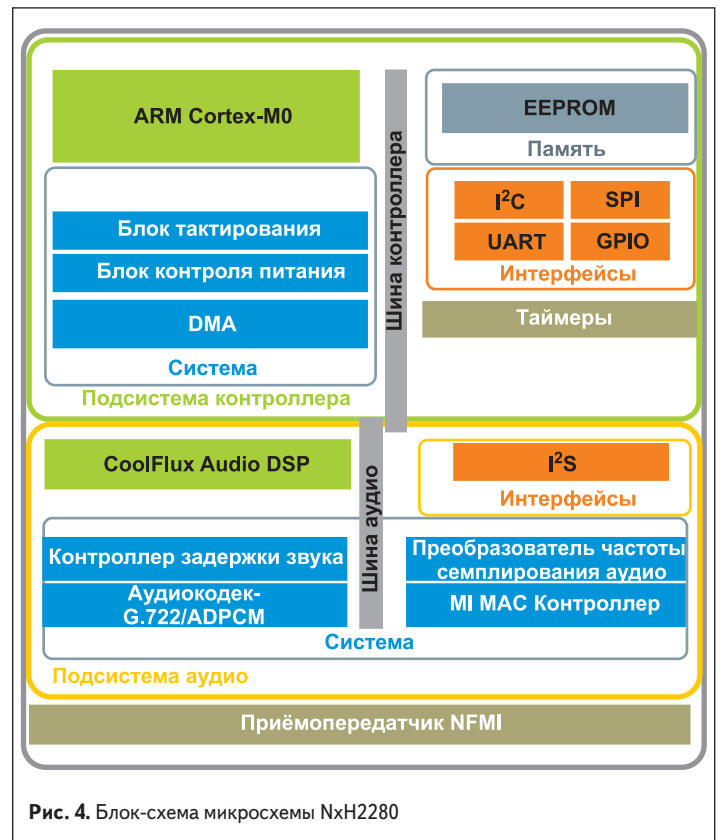


Рис. 4. Блок-схема микросхемы NxB2280

Для повышения помехозащищенности передающая и приемная катушки должны быть заключены в экраны, выполненные в виде незамкнутого медного витка.

Микросхема NxH2280 обладает развитым функционалом, позволяющим строить системы сбора данных с различных датчиков, имеющих аналоговый выход или цифровой интерфейс.

Микросхема содержит:

- программируемый пользователем микроконтроллер на базе ARM Cortex-M0;
- развитый набор системной периферии: блок тактирования, блок контроля питания DMA;
- периферию общего назначения: таймеры, порты ввода/вывода;
- коммуникационные интерфейсы: I²C, UART, SPI;
- развитую аудиосистему: программируемый пользователем цифровой сигнальный процессор Cool Flux DSP, аудиокодек, I²S;
- приемопередатчик NFMI.

Блок-схема микросхемы NxH2280 показана на рис. 4.

Микросхема NxH2280 поддерживает по два канала NFMI на прием и передачу. Также существует возможность многопоточной передачи или приема данных. Скорость передачи позволяет транслировать аудио с частотой семплирования в пределах 16–48 кГц. При этом устройства NxH2280 способны объединиться в сеть с числом участников до 15.

NxH2280 позволяет реализовывать малогабаритные и малопотребляющие устройства благодаря своим особенностям:

- минимальное собственное потребление: 1,2 мА при частоте семплирования 16 кГц и 1,9 мА при частоте семплирования 48 кГц;
- возможность работы с низкими рабочими напряжениями;
- малые габариты: NxH2280 занимает площадь 11 мм².

Выводы

Исходя из изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Существует принципиальная возможность создания низкоскоростных цифровых систем передачи информации ближнего радиуса действия по ферромагнитному каналу с использованием элементной базы для уже существующей беспроводной технологии NFMI. При

этом дальность значительно увеличивается по сравнению с NFMI-каналом в свободном пространстве. В качестве ферромагнитного канала могут быть использованы стальные трубопроводы систем тепло- и водоснабжения зданий.

2. В результате синергии NFMI-технологии и ферромагнитной среды можно получить канал передачи информации, который обладает высокой помехозащищенностью благодаря направленности магнитного потока в среде распространения и слабой чувствительности к внешним электромагнитным помехам.
3. Ферромагнитный канал обладает естественной электромагнитной совместимостью с иными электронными устройствами благодаря его физическим особенностям: пространственной локализации магнитного потока в ближней зоне и доминированию магнитной компоненты в передаваемом сигнале.
4. Ферромагнитный канал может быть конкурентоспособным техническим решением при построении систем телеметрии и сбора данных в случае, когда использование серийных проводных и беспроводных систем аналогичного назначения затруднительно или экономически нецелесообразно.
5. С целью определения потенциальных возможностей использования NFMI-технологии совместно с ФМК в системах «умный дом», IoT-системах, организации каналов связи различных уровней в угледобывающих шахтах необходимо проведение дополнительных исследований распространения магнитного потока в различных средах и оптимизации устройств ввода/вывода сигналов в ферромагнитный канал. ■

Литература

1. Гавриков В. Микросхемы NxH2280 для беспроводной технологии NFMI — там, где Bluetooth бесшумен. www.terraelectronica.ru. 11.10.2016.
2. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М.: Наука, 1990.
3. Семенов Ю. Силовая электроника. М.: Солон-Пресс, 2008.
4. Пейтон А. Дж., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М.: Бинум, 1994.