

DOI: 10.17516/1999-494X-0395

УДК 621.396.945

Hardware Implementation of a System for Transmission of Electromagnetic Signals Through-the-Earth

Ekaterina A. Kohonkova*
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 18.02.2022, received in revised form 09.03.2022, accepted 20.05.2022

Abstract. The article discusses the structure of the system for transmitting and receiving dispatcher commands to mine personnel using a wireless electromagnetic channel through rocks to a depth of 1000 m in the frequency range of 0.3–30 kHz. The methods of modulation and coding of information in the channel are considered taking into account man-made noise.

Keywords: wireless channel, rock, mine, infra-low frequencies, very low frequencies, electromagnetic field, Through-The-Earth.

Citation: Kohonkova, E. A. Hardware implementation of a system for transmission of electromagnetic signals through-the-earth. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 325–337. DOI: 10.17516/1999-494X-0395

Аппаратная реализация системы передачи электромагнитных сигналов через горную породу

Е. А. Кохонькова
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. В статье рассматривается структура системы для передачи и приема команд диспетчера персоналу шахт по беспроводному электромагнитному каналу через горные породы на глубину до 1000 м в частотном диапазоне 0,3–30 кГц. Рассмотрены методы модуляции и кодирования информации в канале с учетом промышленных помех.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: kokhonkova@yandex.ru

Ключевые слова: беспроводной канал, горная порода, шахта, инфранизкие частоты, очень низкие частоты, электромагнитное поле.

Цитирование: Кохонькова, Е. А. Аппаратная реализация системы передачи электромагнитных сигналов через горную породу / Е. А. Кохонькова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 325–337. DOI: 10.17516/1999-494X-0395

Введение

Наравне с традиционными каналами оповещения и связи с персоналом в условиях подземной добычи полезных ископаемых применяются системы беспроводной передачи данных с реализацией технологии TTE (Through-The-Earth). Метод использует электромагнитное поле в диапазоне 3–300 кГц, распространяющееся через горные породы на расстояние, достигающее нескольких сотен метров. Технология TTE доказала свою эффективность для связи и сигнализации в чрезвычайных ситуациях, поскольку обеспечивает передачу информации непосредственно через горные породы [1–6]. Большинство систем низкочастотной беспроводной связи в мире применяют в качестве передающей антенны магнитную петлю диаметром 10–120 м, расположенную на поверхности грунта. В качестве приемных устройств используются стационарные приемные пункты с антенной в виде магнитной петли или индивидуальные компактные приемники.

Альтернативный способ передачи информации был разработан в ЦКБ «Геофизика» и введен в эксплуатацию АО НВИЦ «Радиус». Метод состоит в использовании приземной длинномерной заземленной антенны для увеличения зоны радиопокрытия рудника [4].

При наличии металлоконструкций в горных выработках возможно использование поративных индукционных передатчиков и приемников СЧ-диапазона (300 кГц – 3 МГц) с применением аналоговой частотной модуляции. Данный тип связи способен предавать сигнал по выработкам протяженностью до 5 миль при наличии непрерывной металлической инфраструктуры [7].

В статье предложен метод аппаратной реализации передачи полезного сигнала через горные породы с использованием длинномерной, заземленной в грунт или на контур заземления. Также будут даны рекомендации по повышению помехоустойчивости канала «сверху-вниз», предназначенного для оповещения и индивидуального вызова шахтеров.

Техническая реализация канала связи

Беспроводная система аварийного оповещения и индивидуального вызова позволяет обеспечить сигнализацию с большим радиопокрытием при использовании электромагнитных волн СДВ-диапазона.

В разработку всей системы входят:

- оптимизация алгоритмов фильтрации промышленных помех с частотой 50 Гц и их гармоник, обладающих большой мощностью в ИНЧ- и ОНЧ-диапазонах (0,3–30 кГц). Источниками этих помех являются электрические и коммутационные сети, расположенные в горных выработках, а также работа подземных машин и механизмов;

- выбор помехоустойчивых методов кодирования, учитывающих объем передаваемой информации в виде кодов общей тревоги и индивидуальных номеров персонала;

- обоснование выбора помехоустойчивых методов модуляции, наиболее подходящих для передачи коротких кодовых посылок на низкой частоте;
- описание технических характеристик оборудования для передачи и приема данных, а также описание работы блоков передатчика и приемных устройств.

Коммуникационный комплекс (рис. 1) работает следующим образом: диспетчер отправляет сигнал об аварии или индивидуальный вызов по номеру горняка при помощи персонального компьютера или дистанционного пульта управления, подключенного к блоку управления и модуляции. Блок управления совместно с передатчиком и согласующими трансформаторами и конденсаторами устанавливается на поверхности (например, в пункте связи). К согласующему конденсаторному блоку подключают антенну, длину которой выбирают в зависимости от размеров и конфигурации рудника или шахты. На передатчике устанавливают наиболее подходящую для задачи рабочую частоту. Антенны могут прокладываться в горных выработках и заземлять как на металлоконструкции шахты, так и на металлический каркас шахтного ствола. Это позволяет расширить зону покрытия для глубоких рудников с большой площадью горизонтов. Передающая антенна может развешиваться и на поверхности шахтного поля для рудников и шахт меньших объемов.

Передающий комплект с рабочей частотой 0,3–10 кГц и мощностью 3 кВт включает в себя несколько основных рабочих блоков. Источник питания (ИП) включает в себя выпрямитель (ВП), сглаживающий фильтр (СФ) и источник бесперебойного питания (ИБП). ИП преобразует напряжение питающей сети 380 В в сеть питания силового транзисторного моста и выполняет задачу формирования напряжения 12 В для питания низковольтных цепей передатчика, а также функцию поддержания напряжения в случае отключения питающей сети. Выпрямленное напряжение подается на силовой транзисторный мост (СТМ), обеспечивающий коммутацию первичной обмотки согласующего трансформатора (СТ), по сигналам управления, подаваемым с блока управления и контроля состояния антенн (БУиКСА). СТ обеспечивает гальваническую развязку выходных цепей блока согласования с питающей сетью, а также формирование необходимого выходного напряжения. Это обеспечивает ступенчатую регулировку выходной мощности передатчика и ограничения максимальной амплитуды напряжения на выходных реактивных элементах передающего комплекта. В качестве реактивных элементов используется излучающий антенный кабель и блок согласующих конденсаторов (БСК). Блок согласования содержит в своем составе датчики производной формы тока каждой антенны и группу реле для отключения антенн в случае их неисправности. БУиКСА обеспечивает формирование сигналов управления для управляемого центральным процессором силового транзисторного моста формирующими требуемую кодовую последовательность передаваемой команды. Также он обеспечивает контроль и вычисление физических параметров передающих антенн: индуктивность антенн; активное сопротивление; активная мощность; а также фиксирует обрыв провода или короткое замыкание. Управление передатчиком осуществляется как удаленно (через Ethernet и RS 485), так и при помощи встроенного в передатчик пульта управления. При помощи длинномерных приземных антенн, заземленных в грунт через металлические стержни, на контуры заземления шахты или шахтный ствол осуществляется формирование беспроводного канала передачи данных. Также через блок автоматического ввода резерва (АВР) обеспечивается возможность переключения на дублирующие блоки передатчика (рис. 1).

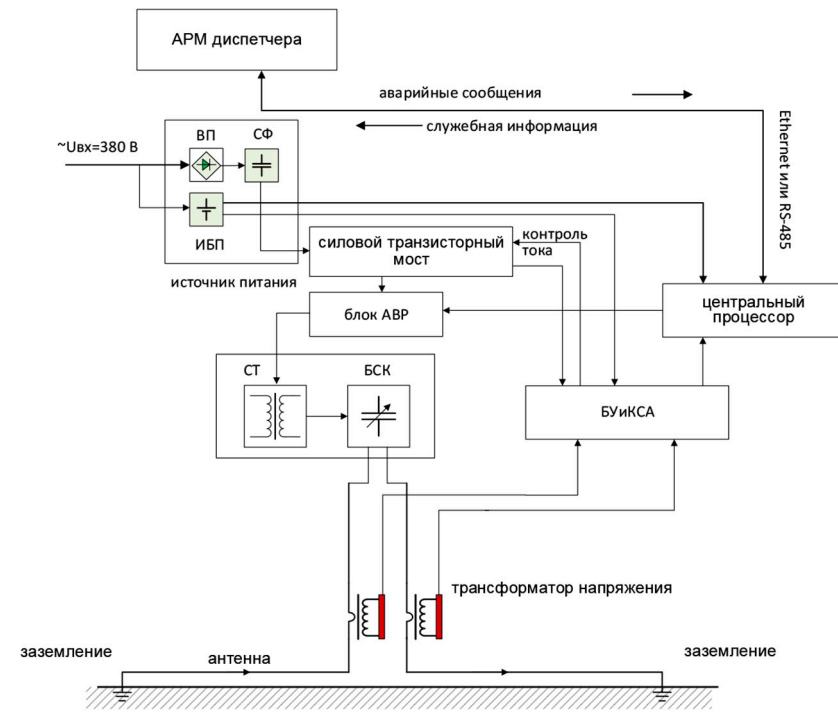


Рис. 1. Структурная схема передатчика для низкочастотного электромагнитного канала связи через горные породы

Fig. 1. Block schematic diagram of a transmitter for a low-frequency electromagnetic communication channel through the earth

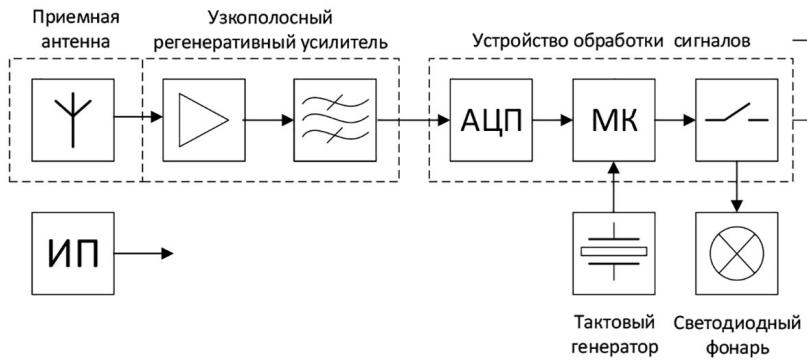


Рис. 2. Структурная схема приемного устройства

Fig. 2. Block schematic diagram of the receiving device

Регистрация сигналов производится при помощи компактного приемника, включающего ферритовую магнитную антенну [10], узкополосный регенеративный усилитель, АЦП, блок фильтрации и демодулятор на базе микроконтроллера (рис. 2). Для визуальной индикации индивидуальное приемное устройство подключается к головному светильнику шахтерской каски через транзисторный ключ. При передаче сигнала индивидуального вызова по ЭМ-каналу с поверхности светильник начинает подавать сигналы периодическим миганием. Этот сигнал

обозначает необходимость связаться с поверхностью по другим каналам или направиться к диспетчерскому пункту связи в выработке. Персональное приемное устройство имеет миниатюрный размер и низкое энергопотребление, что обеспечивает возможность совместного использования с другими системами связи и позиционирования.

Методы повышения помехоустойчивости

Электромагнитные помехи в рудниках и шахтах представляют комбинацию полей промышленной частоты 50 Гц и случайных импульсных последовательностей с широкой динамикой амплитудного распределения со своей спецификой для каждого подземного предприятия.

Рабочая частота канала выбирается таким образом, чтобы в нее попали все гармоники, кратные 50 Гц. Так, на частоте $f = 1200 \text{ Гц}$ в нее попадают 24 гармоники от 50 Гц, 12 гармоник от 100 Гц и т.д. Частота дискретизации в таком случае должна быть в четыре раза больше 1200 Гц, чтобы в период колебания промышленной помехи всегда попадало четыре отсчета. Это позволяет впоследствии высчитать амплитуду помехи из мнимой и действительный компонент сигнала (рис. 3).

Из синфазной $I = 1 \div 3$ и квадратурной $Q = 2 \div 4$ составляющих огибающей сигнала вычисляется амплитуда сигнала $A = \sqrt{I^2 + Q^2}$. В приемнике выделяется сигнал, модулированный кодом номера приемного устройства. Изменение фазы происходит через 20 мс, что кратно частоте 50 Гц. Длительность 1 бита составляет 40 мс. В один период 20 мс укладывается 24 периода сигнала с рабочей частотой 1200 Гц. Полученные активная I и реактивная Q составляющие сигнала суммируются в периоде 20 мс и задерживаются по времени. Затем устройство ждет 20 мс и вычитает из первой вторую сумму I . Так происходит вычитание последующей суммы из предыдущей (рис. 3).

Если фаза сигнала не менялась после 20 мс, то результат вычитания на интервале 40 мс равен величине накопленной случайной помехи. При этом промышленная помеха 50 Гц и ее гармоники компенсируют друг друга. Рассмотрим процесс компенсации помехи (рис. 4): а – помеха, не несущая информации (не манипулированный), поступает на вход АЦП, где происходит процесс дискретизации на частоте 4800 Гц по четыре отсчета на период; б – вычисляются I и Q составляющие за 20 мс и суммируются. Из накопленной суммы вычитается сумма I и Q за следующие 20 мс (накопление промышленной помехи отмечено желтым цветом). Результатом будет полная компенсация и удаление повторяющейся во времени гармонической помехи с большой амплитудой. Останется только помеха, накопленная за 40 мс, которая изменяется во времени случайным образом (отмечено красным цветом); в – фаза

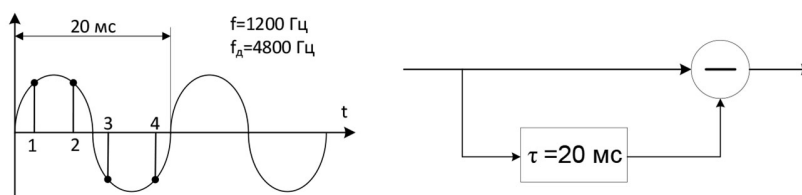


Рис. 3. Процесс дискретизации и компенсации принятого сигнала

Fig. 3. The process of sampling and compensation of the received signal

сигнала изменяется на 180° каждые 20 мс; γ – результатом вычитания второго промежутка в 20 мс из первого будет накопление сигнала. При этом за n повторений полезный сигнал возрастает в n раз (отмечено зеленым цветом), а шум – \sqrt{n} раз. При этом промышленная помеха компенсируется.

Представленный процесс был реализован в качестве математической модели, показывающей процесс зашумления полезного сигнала и удаления помех в программном пакете Matlab. На рис. 5 изображен сигнал без промышленных помех и посторонних шумов среды. Красными

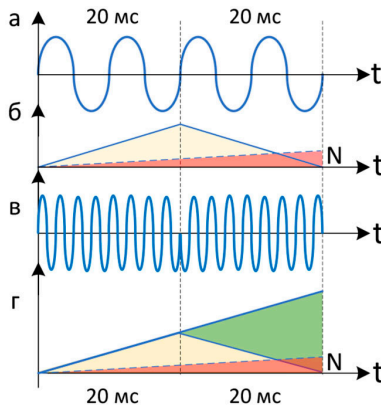


Рис. 4. Процесс накопления сигнала и шума за период длительности бита: а – помеха 50 Гц; б – компенсация помехи 50 Гц за период 40 мс; в – полезный сигнал с фазовой манипуляцией; г – накопленный полезный сигнал за период 40 мс

Fig. 4. The process of signal and noise accumulation over the period of the bit duration: а – interference 50 Hz; б – interference compensation 50 Hz for a period of 40 ms; в – useful signal with phase shift keying; д – accumulated useful signal for a period of 40 ms

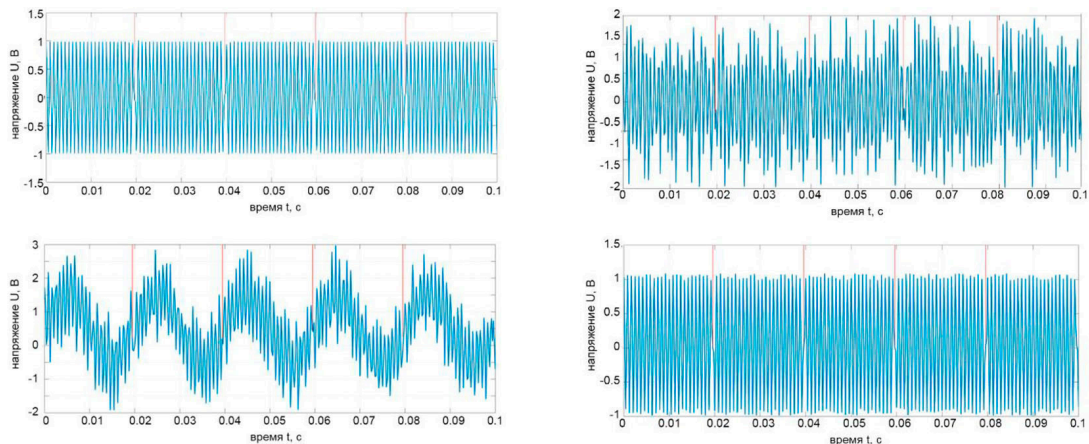


Рис. 5. Несущее колебание со сдвигом фазы на частоте $f_0=1200$ Гц: а – без помех; б – с гауссовским шумом; в – с гауссовским шумом и промышленной помехой на частоте 50 Гц; д – несущее колебание после алгоритма компенсации

Fig. 5. Carrier wave with phase shift at the frequency $f_0=1200$ Hz: а – without interference; б – with Gaussian noise; в – with Gaussian noise and man-made noise at a frequency of 50 Hz; д – the carrier wave after the compensation algorithm

линиями отмечен скачок фазы на 180° , за время 40 мс передается 1 бит сигнала. По описанному ранее алгоритму в процессе накопления и интегрирования в зашумленном сигнале компенсируются промышленные помехи и подавляется гауссовский шум за счет накопления.

В условиях наличия промышленных помех необходимо применение помехоустойчивого кодирования, обеспечивающего обнаружение и исправление ошибок при приеме сигналов с закодированным номером приемника. Так как в канале связи через равные промежутки времени циклично передаются лишь короткие номера приемников, то можно использовать блочный тип корректирующих кодов, к которым относится код Хэмминга (15, 11) [8]. Рассмотрим процесс помехоустойчивого кодирования. Входной вектор – информационное слово: $U=(1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0)$. Определим необходимое количество контрольных бит по формуле

$$k=2^k-m-1=2^k-15-1=2^k-16=4, \quad (1)$$

где k – количество контрольных бит; m – количество информационных бит.

Кодирование линейного блочного кода задается добавлением 4 контрольных бит. Контрольными в данном случае являются разряды, кратные 2^n , т.е. u'_1, u'_2, u'_4, u'_8 :

$$V=(k_1, k_2, u_3, k_3, u_5, u_6, u_7, u_6, u_7, k_4, u_9, u_{10}, u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}).$$

Значение контрольных разрядов вычисляется так:

$$\begin{aligned} k_1 &= u_3 \oplus u_5 \oplus u_7 \oplus u_9 \oplus u_{11} \oplus u_{13} \oplus u_{15} = 1, \\ k_2 &= u_3 \oplus u_6 \oplus u_7 \oplus u_{10} \oplus u_{11} \oplus u_{14} \oplus u_{15} = 0, \\ k_3 &= u_5 \oplus u_6 \oplus u_7 \oplus u_{12} \oplus u_{13} \oplus u_{14} \oplus u_{15} = 1, \\ k_4 &= u_9 \oplus u_{10} \oplus u_{11} \oplus u_{12} \oplus u_{13} \oplus u_{14} \oplus u_{15} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, получим итоговый кодовый вектор V , сочетающий информационные и проверочные биты: $V=(1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0)$.

Таблица 1. Значение разрядов кодового вектора

Table 1. The value of the code vector bits

k_1	k_2	u_3	k_3	u_5	u_6	u_7	k_4	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}
1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0

При декодировании информации в приемнике необходимо вычислить из вектора V синдром S , указывающий на наличие и положение ошибочных бит при помощи контрольных разрядов:

$$\begin{aligned} s_1 &= k_1 \oplus u_3 \oplus u_5 \oplus u_7 \oplus u_9 \oplus u_{11} \oplus u_{13} \oplus u_{15}, \\ s_2 &= k_2 \oplus u_3 \oplus u_6 \oplus u_7 \oplus u_{10} \oplus u_{11} \oplus u_{14} \oplus u_{15}, \\ s_3 &= k_3 \oplus u_5 \oplus u_6 \oplus u_7 \oplus u_{12} \oplus u_{13} \oplus u_{14} \oplus u_{15}, \\ s_4 &= k_4 \oplus u_9 \oplus u_{10} \oplus u_{11} \oplus u_{12} \oplus u_{13} \oplus u_{14} \oplus u_{15}. \end{aligned} \quad (3)$$

Таблица 2. Значение разрядов кодового вектора с ошибочным битом

Table 2. The value of the bits of the code vector with a bit error

k_1	k_2	u_3	k_3	u_5	u_6	u_7	k_4	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}
1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0

В результате вычисления получено число S из k разрядов. При $S=(0\ 0\ 0\ 0)$ передача информационного слова была произведена без ошибок.

Введем в кодовый вектор V ошибку в 10-м разряде и повторно проведем вычисление синдрома S : $V=(1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ \underline{1}\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0)$.

При декодировании информации в приемнике необходимо вычислить из вектора V синдром S , указывающий на наличие и положение ошибочных бит при помощи контрольных разрядов. Было получено значение синдрома $S=(0\ 1\ 0\ 1)$, что указывает на передачу информационного слова с ошибкой в 10-м разряде. Таким образом, корректирующие коды позволяют существенно сократить вероятность битовой ошибки при передаче коротких битовых посылок за счет избыточности и исправления ошибочного бита.

Анализ методов модуляции

Рассмотрим некоторые цифровые методы модуляции по параметру помехоустойчивости, такие как амплитудная манипуляция (АМн), частотная манипуляция (ЧМн) и фазовая манипуляция (ФМн). Для сравнения помехоустойчивости основных видов цифровой модуляции АМн, ЧМн и ОФМн необходимо определить эквивалентную энергию разностного сигнала $S_s(t)=S_1(t)-S_0(t)$ или расстояние между этими сигналами и воспользоваться выражением для расчета средней вероятности ошибочного приема [8]:

$$P = Q\left(\frac{1}{\sqrt{2}}q_s\right) = Q\left[\frac{d(S_1, S_0)}{\sqrt{2N_0}}\right], \quad (4)$$

где $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ – функция ошибок (функция Лапласа);

$$q_s = \sqrt{\frac{E_s}{N_0}} = \frac{d(S_1, S_0)}{\sqrt{N_0}} \text{ – отношение сигнал/помеха по энергии разностного сигнала;}$$

E_s – энергия разностного сигнала; N_0 – спектральная плотность мощности шума.

Эффективность модуляции определяется соотношением энергии сигналов с разными видами модуляции, которые обеспечивают равные вероятности битовых ошибок. На рис. 6 представлен график зависимостей вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/помеха.

Помехоустойчивость трех основных типов манипуляции определяется по формулам расчета вероятности битовой ошибки при заданном отношении сигнал/помеха [8, 9]:

$$P_{AM} = Q\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{E}{N_0}}\right) = Q\left(\frac{1}{\sqrt{2}}q\right). \quad (5)$$

$$P_{\text{ЧМ}} = Q\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2E}{N_0}}\right) = Q(q). \quad (6)$$

$$P_{\text{ФМ}} = Q\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{4E}{N_0}}\right) = Q(2q). \quad (7)$$

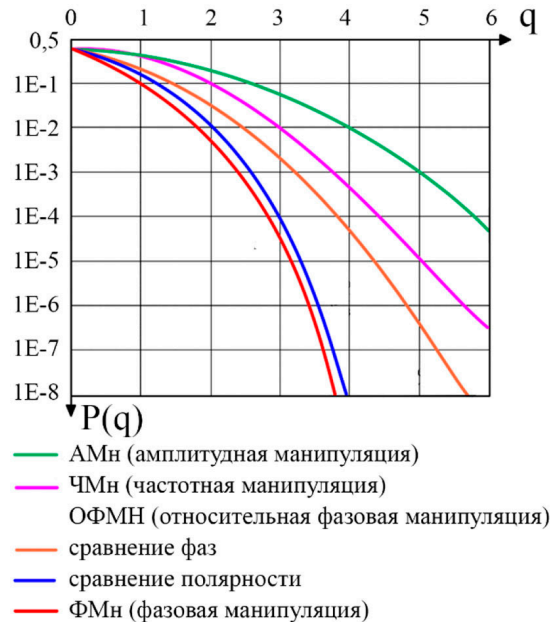


Рис. 6. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/помеха для основных видов цифровой модуляции

Fig. 6. Dependence of the bit error rate on the signal-to-noise ratio for the main types of digital modulation

При одинаковых условиях (энергий сигнала и помех) сигнал с ЧМн в два раза, а сигнал с ФМн в четыре раза более помехоустойчивы, чем АМн. Однако по средней мощности выигрыши ЧМн и ФМн уменьшаются до двух раз. Также следует отметить, что АМн в условиях рудников, вносящих затухание в полезный сигнал, требует большего накопления каждого бита для преодоления порога демодуляции. Стоит учитывать, что все рассматриваемые виды модуляции совмещаются с фазовым методом компенсации промышленных помех.

Далее рассмотрим метод двоичной фазовой манипуляции (ДФМн) – binary phase-shift key (BPSK) и особенности ее реализации. При этом методе фаза несущего колебания изменяется пропорционально битам информационного сигнала. В процессе модуляции цифровой сигнал $b_0(t)$ перемножается с опорным $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, что дает на выходе сигнал с фазовой манипуляцией $S_{bpsk}(t)$. Поскольку поток информации передается со скоростью B_r (бит/с), то длительность импульса определяется как $T=1/B_r$. При умножении цифрового сигнала на опорный $\varphi_0 = -\pi/2$ на выходе модулятора получаем сигнал со скачком фазы на π (180°). Каждый раз

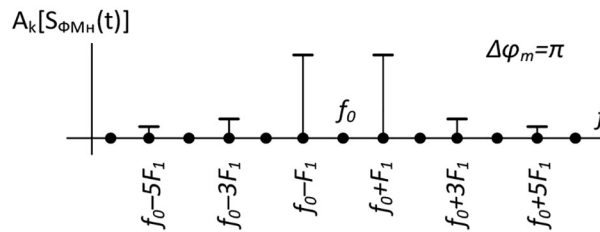


Рис. 7. Спектр цифрового сигнала при двоичной фазовой манипуляции

Fig. 7. Spectrum of a digital signal with binary phase shift keying

при смене «1» на «0» и обратно происходит скачок фазы сигнала (рис. 7). Для формирования стабильного канала в условиях передачи через сплошные горные породы необходимо увеличить время накопления сигнала. Например, до $T=1$ с, что соответствует битовой скорости $B_r = 1$ бит/с (1.25 бод).

Сам ФМн-сигнал имеет вид последовательностей радиоимпульсов с огибающей прямоугольной формы [8]:

$$S_{PSK} = A_m \cdot \cos[\omega_0 t + (1 + x_c(t) \cdot \Delta\varphi)], \quad (8)$$

где $x_c(t)$ – нормированная функция значений -1 и 1 , обозначающая изменение информационного сигнала; A_m – амплитуда; $\Delta\varphi_m$ – девиация фазы; ω_0 – несущая угловая частота.

При выборе значения девиации фазы необходимо учитывать сильное влияние производственных помех на частоте 50 Гц и кратных ей гармоник в диапазоне ОНЧ. В процессе реализации алгоритма подавления этих помех сигнал на несущей частоте $f_0=1200$ Гц также будет подавлен, из чего следует потребность полностью перенести энергию полезного сигнала в боковые полосы модуляции и $f_0 \pm F_1$ при $F_1=25$ Гц. Этот перенос осуществляется повышением девиации фазы до значения $\Delta\varphi_m=\pi$.

Приемные устройства являются некогерентными, то есть не согласованы по фазе с задающим генератором передатчика и не могут отделить случайный скачок фазы от заданного. Кроме того, приемные устройства могут включиться на прием сигнала в любое несогласованное время и станут принимать поток бит не в начале битовой последовательности. Это делает демодуляцию ошибочной.

Для решения этой проблемы применяют относительную фазовую манипуляцию (ОФМн или DBPSK). При передаче номера шахтера (непосредственно перед информационной битовой последовательностью) передаются три стартовых бита «1 0 1». Каждому информационному биту соответствует не абсолютное значение фазы, а ее изменение относительно предыдущего значения. Приемник заранее закодирован на то, что в начале каждого сообщения присутствуют стартовые биты «1 0 1», а смена фазы уже будет означать противоположное значение после «1».

Альтернативным методом является распространенный в телекоммуникации метод частотной манипуляции (ЧМн) – *frequency shift key* (FSK). В данном канале связи используется модификация этого метода модуляции – частотная манипуляция с непрерывной фазой (CPFSK), которая способствует снижению уровня боковых лепестков (рис. 8). Частота несущего колебания

меняется в соответствии с информационным сигналом и сохранением фазы несущего колебания. Сигнал в таком случае можно представить в виде суммы двух несущих, соответствующих двум значениям информационного сигнала [8]:

$$\begin{aligned} S(t) &= S_i(t) + S_h(t), \\ S_i(t) &= b_i(t) \cdot \cos((\omega_0 - \omega_d)t), \\ S_h(t) &= b_h(t) \cdot \cos((\omega_0 + \omega_d)t), \end{aligned} \quad (9)$$

где $b_i(t)$, $b_h(t)$ – информационные сигналы;

$\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$ – угловая частота несущего колебания;

$\omega_d = 2\pi \cdot f_d \cdot m$ – угловая частота девиации FSK-сигнала;

$F_b = B_r/2 = 0,5$ – частота повторения бита в цифровом сигнале;

m – индекс модуляции.

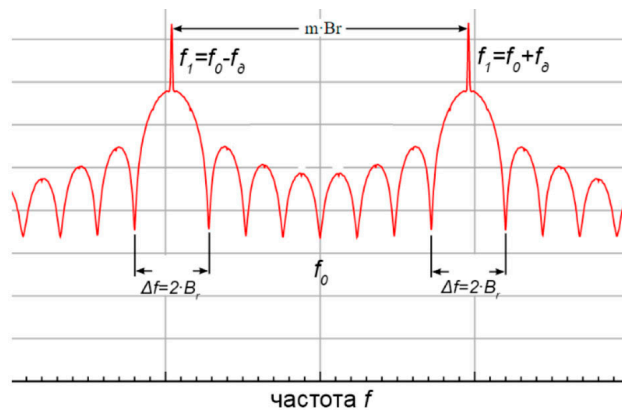


Рис. 8. Спектральная характеристика сигнала с частотной манипуляцией

Fig. 8. Spectral response of the signal with frequency shift keying

Для низкочастотной системы связи через горные породы низкая частота девиации f_d и малая ширина главного лепестка в спектре Δf стоят в приоритете перед битовой скоростью передачи данных B_r , поскольку уровень сигнала в такой среде очень зависит от его частоты. Для передачи коротких команд и номеров шахтеров на приемники не требуется высокой битовой скорости. Из этого ограничения были выбраны следующие характеристики CFSK модуляции сигнала: $B_r = 1$; $f_0 = 975$ Гц; $m = 18$; $f_d = 9$ Гц; $\Delta f = 2$ Гц; $f_1 = 966$ Гц; $f_2 = 984$ Гц. Такой подбор параметров также позволяет избежать промышленных помех, кратных 50 Гц в полосе полезного сигнала.

Заключение

В связи с высоким уровнем промышленных помех от работающих в выработках электрических машин и сетей электроснабжения и для обеспечения качественной передачи сообщений необходимо использовать все известные в радиотехнике эффективные методы повышения помехоустойчивости. Наиболее устойчивыми в условиях рудников являют-

ся частотная манипуляция с непрерывной фазой CFSK и двоичная фазовая манипуляция BPSK, так как среда горных массивов оказывает влияние на амплитуду сигнала, не искажая параметры фазы и частоты. Для повышения помехозащищенности предпочтительно использовать корректирующие коды, позволяющие обнаруживать и исправлять ошибки за счет избыточности. На низких частотах в горных выработках вблизи сетей электроснабжения сосредоточены промышленные помехи, кратные 50 Гц. Метод компенсации промышленных помех также повышает помехоустойчивость канала. Для увеличения отношения сигнал/шум также возможно использовать повышение мощности передатчика, выбор в качестве мест заземления передающей антенны металлических конструкций стволов рудника или контуров заземления. Конфигурация передающей антенны, длина и место расположения выбираются с учетом топологии горных выработок, глубины шахты и геометрии рудных залежей.

Список литературы / References

[1] Шайдуров Г.Я., Кохонькова Е.А., Кудинов Д.С. и др. *Системы беспроводной связи и сигнализации через горную породу на электромагнитных и сейсмических волнах*. Под ред. Г.Я. Шайдурова. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2021. 252 с. [Shaidurov G. Ya., Kohonkova E. A., Kudinov D. S. and others. *Systems of wireless communication and signaling through the rock on electromagnetic and seismic waves*. Ed. G. Ya. Shaidurov. Krasnoyarsk: Sibirskij federalnyj universitet, 2021. 252 p. (in Russian)].

[2] Технология передачи данных через горные породы на низкой частоте. CanaryComm-IS. Vital Alert [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vitalalert.com/product/canarycommis/>. [Technology of data transmission through the rocks at low frequency. CanaryComm-IS. Vital Alert. [Electronic resource] – Access: <https://vitalalert.com/product/canarycommis/>].

[3] Магнитная система связи. MagneLink [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mining-technology.com/features/featurelockheed-martin-post-accident-wireless-mining-communication/>. [Magnetic Communication System. MagneLink. [Electronic resource] – Access: <https://www.mining-technology.com/features/featurelockheed-martin-post-accident-wireless-mining-communication/>].

[4] Система аварийного оповещения для шахт «Радиус-2» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://radius-nvic.ru/page7059197.html>. [Emergency warning system for mines Radius-2. [Electronic resource] – Access: <http://radius-nvic.ru/page7059197.html>].

[5] Многофункциональная система связи Flexcom [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://flexcom.akvarius.lv/downloads/doc/flexcom/system/MSB_FLEXCOM.pdf [Multifunctional system Flexcom. The PBE Group (Headquarter) Mine Radio Systems-R. [Electronic resource] – Access: https://flexcom.akvarius.lv/downloads/doc/flexcom/system/MSB_FLEXCOM.pdf].

[6] Коммуникационная система CanaryComm-IS [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vitalalert.com/product/canarycommis/>. [Communication system CanaryComm-IS. Vital Alert. [Electronic resource] – Access: <https://vitalalert.com/product/canarycommis/>].

[7] Компактное портативное радио для шахт DRUM [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.kuttaradios.com/DRUM100P.html>. [DRUM Compact Portable (CP) Radio. Kutta Radios, Inc. [Electronic resource] – Access: <https://www.kuttaradios.com/DRUM100P.html>].

[8] Деев В.В. *Методы модуляции и кодирования в современных системах связи*. М.: Наука, 2007. 268 с. [Deev V.V. *Methods of modulation and coding in modern communication systems*. Moscow, Nauka, 2007. 268 p. (in Russian)].

[9] Варакин Л.Е. *Системы связи с шумоподобными сигналами*. М.: Радио и связь, 1985. 384 с. [Varakin L.E. *Communication systems with noise-like signals*. Moscow: Radio i svyaz, 1985. 384 p. (in Russian)].

[10] Хомич В.И. *Приемные ферритовые антенны*. Издание второе. Дополненное и переработанное. Москва-Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1963. 63 с. [Khomich V.I. *Receiving ferrite antennas*. Second edition. Supplemented and revised. Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatelstvo, 1963. 63 p. (in Russian)].