

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.11>

УДК: 621.396

БЮДЖЕТ ПОДЗЕМНОГО КАНАЛА БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ СКВОЗЬ ГОРНУЮ ПОРОДУ

Д. В. Федосов¹, А. В. Николаев^{2,3}, А. В. Колесников¹

¹ КВ-СВЯЗЬ, 644012, Омск, пр. Академика Королева, 32

² Московский технический университет связи и информатики, 111024, Москва,
Авиамоторная улица, д.8а

³ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101990, Москва, Малый
Харитоньевский переулок, д.4

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2021 г.

Аннотация. В настоящее время для беспроводной связи сквозь горную породу в шахтах находят применение радиостанции диапазона сверхдлинных волн (СДВ) мощностью в несколько сотен и тысяч Вт с крупногабаритными антеннами (сотни и тысячи метров). Такие радиостанции позволяют обеспечивать односторонний канал связи с информированием горняков о возникновении аварийных ситуаций. Кроме того, в последнее время распространение получили и портативные радиостанции диапазона средних волн (СВ), которые используют для связи направляющие одно- или двухпроводные линии, проложенные вдоль горных выработок, и малогабаритные антенны. В связи с этим актуальной научной задачей является оценка бюджета подземного канала беспроводной связи сквозь горную породу при использовании портативной радиостанции и малогабаритных антенн. Цель статьи: провести анализ характеристик каналов подземной связи в диапазоне от 1 кГц до 10 МГц, сравнить бюджет и отношение сигнал/шум СВ канала с каналами диапазона низких частот (НЧ). В результате проведенного анализа оценены потери в подземном канале связи в диапазоне от 1 кГц до 10 МГц: на выходе передающей антенны, в месте приёма, на выходе приёмной антенны. Приведен подробный расчет бюджета на частоте 1 МГц для радиотрассы протяженностью 100 метров для различных, характерных для горных пород,

значений электропроводности. Акцентируется внимание на коэффициенте полезного действия (КПД) малогабаритной антенны и его вкладе в бюджет канала связи. Показано, что два противоположных фактора: падение КПД антенны и снижение потерь в полупроводящей среде при понижении рабочей частоты - приводят к возникновению оптимальных частот радиосвязи, зависящих от различных значений электропроводности горных пород, являющихся полупроводящими средами. Полученные результаты исследований обоснованно подтверждают эффективность применения малогабаритных (в том числе портативных) радиостанций диапазона СВ для организации двусторонней беспроводной связи между горизонтами в шахтах. Полученные оптимальные частоты позволяют выбрать рабочий диапазон в рудниках, расположенных в горных породах с различными электрофизическими характеристиками.

Ключевые слова: подземная связь, шахтная связь, аварийная связь, полупроводящая среда, бюджет канала связи, малогабаритная антенна, электрически малая антенна.

Abstract. At present, radio stations of the very-long wave (VLW) range with a power of several hundred and thousands of watts with large antennas (hundreds and thousands of meters) are used for wireless through-the-earth communication in mines. Such radio stations allow providing a one-way communication channel informing miners about emergencies. In addition, in recent years, portable radio stations of the medium-frequency (MF) band have also become widespread, which use monofil or bifilar lines laid along mine tunnel for communication, and electrically small antennas. In this regard, an urgent scientific task is to estimate the budget of an underground wireless communication channel wireless through-the-earth using a portable radio station and electrically small antennas. Purpose of the article: to analyze the characteristics of through-the-earth communication channels in the range from 1 kHz to 10 MHz, to compare the budget and signal-to-noise ratio of the MF channel with the channels in the low frequency (LF) band. As a result, the losses in the through-the-earth communication channel in the range from 1 kHz to 10 MHz are estimated: at the output of the transmitting antenna, at the receiving point, at the output of the receiving

antenna. A detailed calculation of the budget at a frequency of 1 MHz for a radio path with a length of 100 meters for various values of electrical conductivity characteristic of rocks is presented. Attention is focused on the antenna efficiency and its contribution to the budget of the communication channel. It is shown that two opposite factors: a drop in the antenna efficiency and a decrease in losses in a semiconducting medium with a decrease in the operating frequency, lead to the emergence of optimal radio frequencies, depending on various values of the electrical conductivity of rocks, which are semiconducting media. Practical relevance. The obtained research results justifiably confirm the effectiveness of using small-sized (including portable) radio stations of the MF band for organizing two-way through-the-earth communication between levels in mines. The obtained optimal frequencies make it possible to select the operating range in mines located in rocks with different electrophysical characteristics.

Key words: through-the-earth communications, mine communications, emergency communications, semiconducting medium, communications channel budget, electrically small antenna.

Введение.

XX век характеризовался значительным ростом объёма добычи полезных ископаемых. Последние 60 лет добыча полезных ископаемых на каждого жителя Земли возрастала от 12,6 до 19,6 % в год, с удвоением каждые 10 лет [1]. При этом, растет глубина горных работ, увеличиваются объемно-планировочные решения в шахтах, появляются дополнительные сложности в технологиях проведения горнопроходческих работ, а в случае аварий – аварийно-спасательных работ. Данные обстоятельства приводят к необходимости использования новых каналов подземной связи, обладающих высокой надежностью и безотказностью в работе. В 1920-х гг. начались исследования возможности организации связи с горнорабочими в различных диапазонах частот электромагнитных волн (ЭМВ) и на данный момент, можно выделить четыре вида каналов связи [2-4]:

- проводные каналы со стационарными пунктами;
- беспроводные каналы ультракоротковолновых (УКВ) диапазонов, строятся либо на основе специальных излучающих фидеров (передающих и принимающих электромагнитные волны по всей длине шахты), либо с использованием часто расположенных ретрансляторов, соединенных радиочастотными кабелями (к настоящему времени, в основном, оптоволоконными) и с подведением питания;
- каналы связи через направляющие линии (диапазон СВ), которые строятся на основе эффекта распространения ЭМВ вдоль металлической направляющей линии (специально уложенный провод с согласованной нагрузкой, питающие кабели, троллейные линии, металлические трубы и т.п.), аналогичном движению волны вдоль однопроводных линий;
- системы связи через породу, организуются в диапазоне от 3 Гц до 30 кГц как односторонние, используют большие протяженные электрические и электродные антенны, или рамки с габаритами в десятки и сотни метров на поверхности земли, и приемные антенны меньших габаритов в шахтах, ферритовые датчики, используются для аварийного оповещения и поиска горнорабочих в случае аварии (обвалы, взрывы, пожары).

Каналы проводной связи и беспроводные системы УКВ относят к первичным, а каналы связи через направляющие и каналы связи сквозь породу – ко вторичным. Данное деление связано с тем, что первичные каналы связи позволяют организовать связь между горняками и диспетчерскими пунктами, радиочастотную идентификацию, передачу данных от подвижной, стационарной и горнопроходческой аппаратуры, и используются в качестве основных во многих шахтах. Однако, в случае аварии велика вероятность обрыва кабельной инфраструктуры, в результате чего часть шахты оказывается лишенной связи.

Для обеспечения информацией об аварийной ситуации используются вторичные каналы, сохраняющие работоспособность. В данном случае горнорабочие могут получать текстовую информацию о действиях, необходимых для спасения. Для этих целей используют диапазон СДВ, и

выделяют каналы с антеннами магнитного и электродного типов и с протяженными, до нескольких км, СДВ-антеннами, проложенными на поверхности земли или вдоль одного из горизонтов шахты. Для организации нисходящего канала используются большие мощности (в несколько сотен и тысяч Вт), а организация восходящего канала требует наличия стационарных радиостанции с крупногабаритными антеннами, проложенными в выработках. При этом для шахт, в которых могут скапливаться взрывоопасные газовые смеси, ограничивается мощность подземного радиооборудования до 6 Вт и запрещается в нем использовать подземные антенны электродного типа. Эффективность восходящего канала в данном случае крайне мала, и в большинстве случаев, возможна только односторонняя передача данных сверху вниз.

Известные модели радиолиний основаны на расчёте компонент электромагнитного поля для горизонтально или вертикально ориентированных магнитных антенн или электрических диполей, в частности [5–8]. В работах [9, 10] дополнительно использовано моделирование в среде CST Microwave Studio. В результате анализа показано наличие оптимальных частот для различной глубины, ориентации антенн и электрофизических параметров сред. Аналогичные результаты получены в [11] с учётом экспериментально измеренных шумов в одной из выработок.

Проводились исследования по изучению механизма распространения ЭМВ СВ диапазона, показавшие их эффективное прохождение через толщу горной породы. Однако, на данный момент, диапазон СВ используется только для беспроводной связи при проведении спасательных операций, в основном, для связи через направляющие линии [3, 4]. Широкому распространению СВ радиокomплексов препятствовали несколько факторов: неудобство использования крупногабаритных аналоговых приёмопередатчиков, малая эффективность антенного оборудования, медленная скорость резонансной перестройки частоты антенны или её отсутствие. Современное состояние цифровой и аналоговой элементной базы позволяет разрабатывать приёмопередатчики с максимальными габаритами не более 10–15 см, то есть

технологического барьера для создания удобных портативных устройств уже нет. На рынке представлена портативная радиоаппаратура диапазона СВ: фирмы KUTTA (США) [12], работающая на одной частоте 450 кГц, комплекс ВЭБР «КИС-1» (РФ) [13], работающий в диапазоне от 1025 до 1225 кГц, аппаратура горноспасательной связи «Кварц – 3М» (портативная радиостанция) с рамочной антенной и Кварц–КП-М (радиостанция для командного пункта) [14], работающие на частоте 266 кГц и требующие наличия направляющей линии для организации связи. Также на рынке представлена аппаратура FERRA фирмы КВ-СВЯЗЬ [15] и её зарубежный аналог DEZEGA, состоящая из портативной радиостанции, электрических антенн и устройств согласования с направляющими линиями, позволяющая организовать несколько каналов связи в поддиапазонах от 950 до 1050 кГц и от 1900 до 2000 кГц с автоматической перестройкой рабочей частоты.

Поскольку распространение получили портативные станции малой мощности диапазона СВ, возникает потребность анализа возможности организации восходящего канала связи через породу с использованием компактного оборудования малой мощности.

В связи с указанным выше, следует отметить, что в известной литературе не достаточно разработаны принципы комплексного анализа подземных линий связи, учитывающего общие вопросы передачи радиосигналов различных диапазонов с учётом эффективности антенн размерами $ka \ll 1$ (где $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, a – радиус минимальной условной сферы вокруг антенны).

Цель статьи – провести анализ характеристик каналов подземной связи в диапазоне от 1 кГц до 10 МГц, сравнить бюджет и отношение сигнал/шум СВ канала с каналами диапазона НЧ.

1. Основные определения и расчётные соотношения

Проведем расчётные соотношения характеристик канала связи для радиосигнала PSK31 и аналогового с однополосной модуляцией – SSB.

Рассматриваемые виды модуляции являются достаточными для голосовой связи и передачи данных при аварийно-спасательных работах. Базовые определения и соотношения для расчёта различных каналов связи приведены в [16, 17].

КПД антенны:

$$EFF = P_{RAD}/P_{ACC} = P_{RAD}/(P_{SRC} - P_{REF}) = R_{RAD}/(R_{RAD} + R_{RES}), (1)$$

где P_{RAD} – мощность излучения, P_{ACC} – поглощаемая антенной мощность источника, P_{SRC} – мощность источника, P_{REF} – отраженная мощность, R_{RAD} – сопротивление излучения, R_{RES} – сопротивление потерь. КПД антенны, выраженное в дБ:

$$EFF = 10\log_{10}(P_{RAD}/P_{ACC}), dB. (2)$$

Поглощаемая антенной мощность источника в дБ:

$$P_{ACC} = P_{SRC} + L_{\Gamma}, dB, (3)$$

где L_{Γ} – потери на рассогласование:

$$L_{\Gamma} = 10\log_{10}(1 - |S_{11}|^2), dB, (4)$$

при коэффициенте отражения $0 < S_{11} < 1$, потери на рассогласование $L_{\Gamma} < 0$.

Для надземных линий связи используется коэффициент усиления:

$$G_A = D_A + EFF, dB, (5)$$

где D_A – коэффициент направленного действия антенны. Антенны с электрическими размерами $ka < 0,1$ являются слабонаправленными. В реальных условиях эксплуатации в шахтах определить направленность антенны невозможно, коэффициент D_A варьируется примерно в пределах от 1 до 4 дБ. По этой причине в дальнейших расчетах будет указываться конкретное значение без дополнительных оговорок.

Потери на распространение в полупроводящей среде определяются выражением:

$$E_X(x) = E_{x0} \exp(-j\alpha X), (6)$$

или

$$L_X = 20\log_{10}(\exp(-j\alpha X)), dB, (7)$$

где, для среды без существенных магнитных потерь, коэффициент затухания:

$$\alpha(\omega) = \operatorname{Re} \left(\dot{k}(\omega) \right), \quad (8)$$

и комплексный коэффициент распространения в среде:

$$k(\omega) = 2\pi f \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \sqrt{\varepsilon_k - i \frac{\sigma_k}{\omega \varepsilon_0}}, \quad (9)$$

где ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, σ_k и ε_k – проводимость и диэлектрическая проницаемость среды.

Таким образом, принятая мощность гармонического сигнала:

$$P_{RA} = L_{\Gamma 2} + D_{A2} + EFF_2 + P_{SRC} + L_{\Gamma 1} + D_{A1} + EFF_1 - L_X, \text{ dB}, \quad (10)$$

где слагаемые с индексом «2» характеризуют согласование, направленность и КПД приёмной антенны, соответственно, с индексом «1» – передающей.

Отношение сигнал/шум на приёме:

$$SNR = P_{RA} - P_{NOIS}, \text{ dB}, \quad (11)$$

где P_{NOIS} – мощность шума.

Отношение энергии одного бит принимаемого сообщения (E_b) к спектральной плотности мощности шума P_{NOIS} на 1 Гц при скорости передачи данных bps дБбит/с:

$$E_b/N_0 = SNR - bps, \text{ dB}, \quad (12)$$

Для передачи цифровых текстовых сообщений с модуляцией PSK31 $bps = 31$ бит/с (14,9 дБбит/с).

2. Оптимальные частоты различных каналов связи

Ниже приведем расчёт некоторых радиолиний. В качестве антенны выберем электрически малую рамочную антенну с радиусом $a = 0,5$ м и диаметром проводника 2: $b = 4$ мм. Определим её КПД по следующим соотношениям [18]:

$$R_{RAD} = \eta_0 (\pi/6) (ka)^4, \quad (13)$$

$$R_{RES} = (Na/b) \sqrt{(\omega \mu_0 / (2\sigma_{LOOP}))} (R_p/R_0 + 1), \quad (14)$$

$$R_{RES} = (Na/b) \sqrt{\omega \mu_0 / (2\sigma_{LOOP})} (R_p/R_0 + 1), \quad (14)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве, $\eta_0 = 120\pi$ Ом – волновое сопротивление свободного пространства, σ_{LOOP} – проводимость рамки (возьмём проводимость меди $\sigma_{LOOP} = \sigma_{CU} = 59 \cdot 10^6$ См/м). Отношение R_p/R_0 берется из графика рис. 1а в зависимости от отношения межвиткового расстояния к диаметру проводника рамки (рис. 1б).

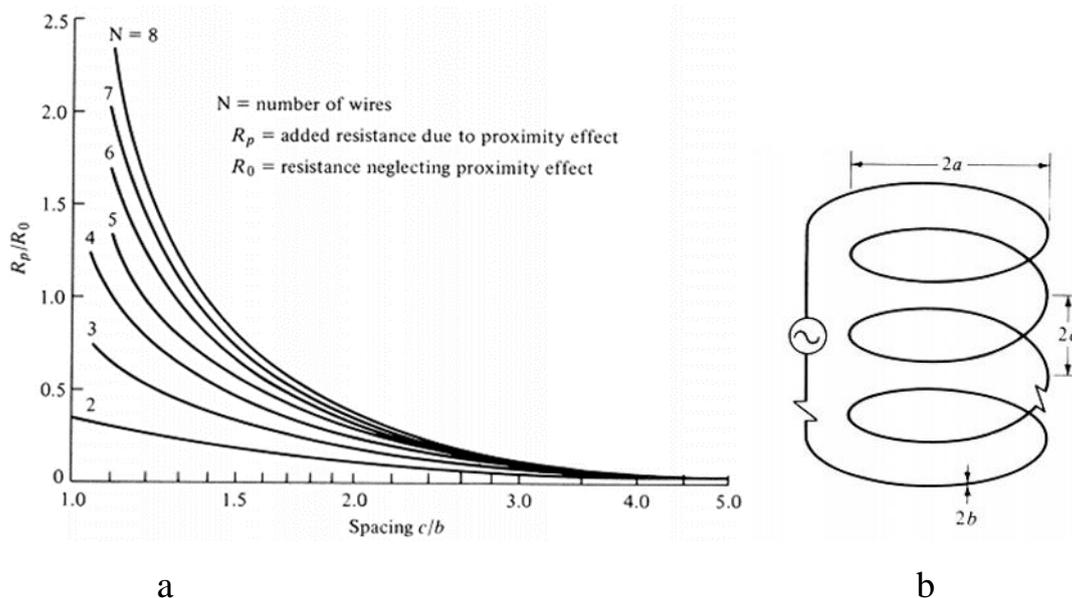


Рис. 1. К определению потерь в рамочной антенне [18].

Эффективность резонансных антенн значительно возрастает на частоте резонанса. Согласно исследованиям авторов настоящей статьи, эффективность антенны с габаритами порядка 1 м может быть более 10 % на частоте 1 МГц [19]. На рис. 2 представлен графики зависимостей EFF от частоты и электрических размеров ka для одновитковой ($N=1$) рамочной антенны по (1), (12), (13) и резонансной антенны при КПД = 10 % на частоте 1 МГц. Как видно из графиков, КПД резко уменьшается при уменьшении электрических размеров.

Рудники и шахты характеризуются различными электрофизическими параметрами горной среды. Наибольшие технологические трудности для организации связи представляют опасные ко взрыву угольные шахты, с ограничением на мощность радиостанций 6 Вт из-за вероятности взрыва газовой составляющей в окружающем пространстве. В зависимости от геофизических условий и обводненности породы, проводимость угля лежит в пределах от 10^{-4}

до 1 См/м. Средние значения для некоторых пород, в том числе угольных, приведены в таблице 1 [20–23].

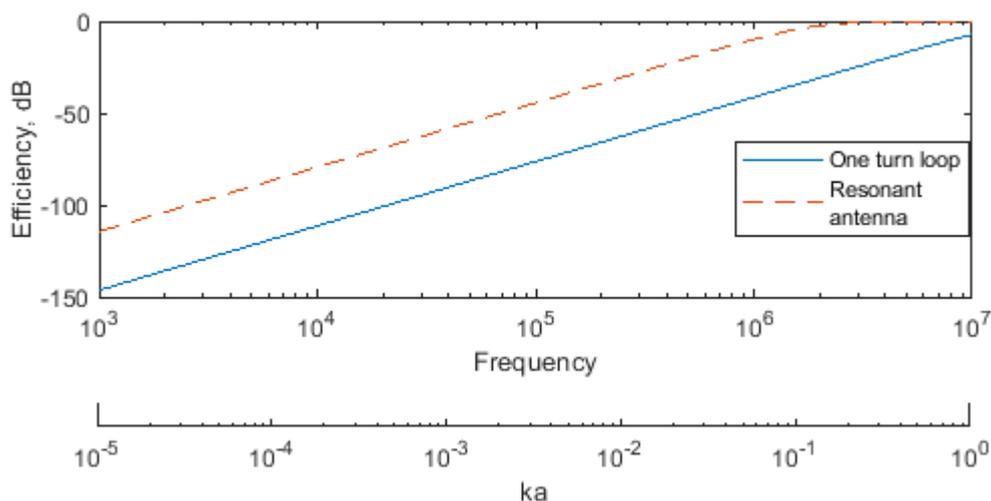


Рис. 2. КПД нерезонансной рамочной антенны и резонансной антенны.

Таблица 1. Средние значения проводимости для некоторых горных пород.

Порода	Проводимость, См/м
Глинистые сланцы	$2 \times 10^{-4} \div 0.2$
Мергели	$2 \times 10^{-3} \div 5 \times 10^{-2}$
Известняк	$10^{-5} \div 10^{-2}$
Доломит	$10^{-5} \div 2 \times 10^{-2}$
Угольные породы	$10^{-4} \div 10^{-1}$
- Антрацит	$10^{-2} \div 10^{-1}$
- Лигнит	$5 \times 10^{-3} \div 10^{-1}$
- Жирный уголь	$10^{-4} \div 10^{-2}$
- Коксующийся уголь	$\sim 2 \times 10^{-3}$
- Тощий уголь	$3 \times 10^{-3} \div 10^{-1}$

На рис. 3 приведены зависимости потерь на распространение в полупроводящей среде от частоты, рассчитанной в соответствии с выражением (7), для $\sigma_k = 10^{-4}; 10^{-3}; 5 \times 10^{-3}; 10^{-2}$ См/м и диэлектрической проницаемости $\epsilon_k = 10$ для трассы протяженностью 100 м.

На поверхности внешний радиосум (естественный фон) в полосе 1 Гц определяется из соотношения:

$$P_{NOIS} = F_a + 10 \log_{10} B - 204, dBW, (14)$$

где F_a – коэффициент внешнего шума, определяемый по частотным зависимостям из рекомендаций МСЭ-R P.372-9 [24], B – ширина полосы приёма. На рис. 4 приведены зависимости минимальных ожидаемых значений $P_{NOIS}(f)$ в диапазоне от 1 кГц до 10 МГц.

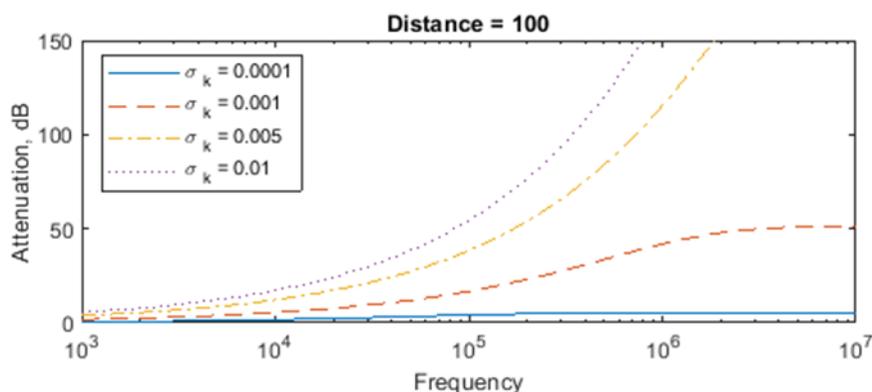


Рис. 3. Частотная зависимость ослабления напряженности поля в полупроводящих средах с различной электропроводностью.

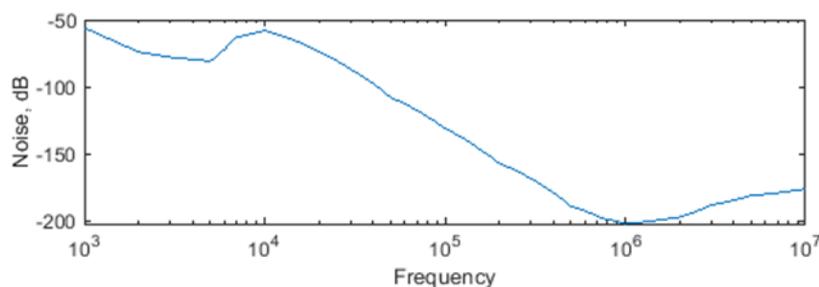


Рис. 4. Минимально ожидаемые значения мощности внешнего атмосферного шума.

Ниже, в таблице 2, проведен анализ бюджета восходящего канала связи при расстоянии трассы $X = 100$ м на частоте 1 МГц.

Таблица 2. Расчёт бюджета подземного восходящего канала связи PSK31 на частоте 1 МГц.

Мощность источника P_{SRC}	5 Вт	7 дБВт
Потери на рассогласование $L_{Г1}$	КСВ < 1.5	- 0.2 дБВт

КПД передающей антенны EFF_1	10 %	-10 дБ
КНД в направлении приёма D_1		1 ~ 4 дБ
Потери на распространение L_X	$\sigma_k = 5 \times 10^{-3}$	- 115.5 дБ
Условная изотропно-принимаемая мощность		- 117.7 ~ - 114.7 дБВт
КНД в направлении передачи D_2		1 ~ 4 дБ
КПД приёмной антенны EFF_2	10 %	-10 дБ
Потери на рассогласование приёмной антенны $L_{Г2}$	$KCB < 1.5$	- 0.2 дБВт
Мощность принятого сигнала $P_{РА}$		-126.9 ~ -123.9 дБВт
Уровень внешнего естественного шума		- 202 дБВт
Принятый SNR		75.1 ~ 78.1 дБГц
Скорость передачи данных bps	PSK31 (31 бит/с)	- 14.9 дБбит/с
Принятый E_b/N_0		60.2 ~ 63.2 дБ

На рис. 5 приведены зависимости $P_{РА}$ и SNR от частоты по (10), (11) для восходящего канала связи при различных σ_k при $X = 100$ м, $D_1 = D_2 = 1$ дБ, зависимости E_b/N_0 от частоты по (12) для этого канала при bps = 31 бит/с (PSK31). По графикам видно, что оптимальные частоты для $\sigma_k < 10^{-3}$ См/м лежат выше 1 МГц, при этом резерв канала связи превышает 100 дБ, для $\sigma_k = 5 \times 10^{-2}$ См/м оптимальные частоты лежат ниже, в районе 750 кГц, для $\sigma_k = 10^{-2}$ См/м оптимальные частоты лежат в районе 500 кГц. В данном случае использована зависимость КПД для резонансной антенны (рис. 2). Оптимальные частоты в меньшей степени зависят от уровня внешнего шума, однако, естественный фон, в данном случае, согласно рис. 4 сдвигает их ближе к частоте 1 МГц.

На рис. 6 для того же канала на частоте 1 МГц приведены зависимости SNR и E_b/N_0 от σ_k в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-1} См/м при условии одинаковой направленности передающих и приёмных антенн в обоих случаях $D_1 = D_2 = 1$ дБ

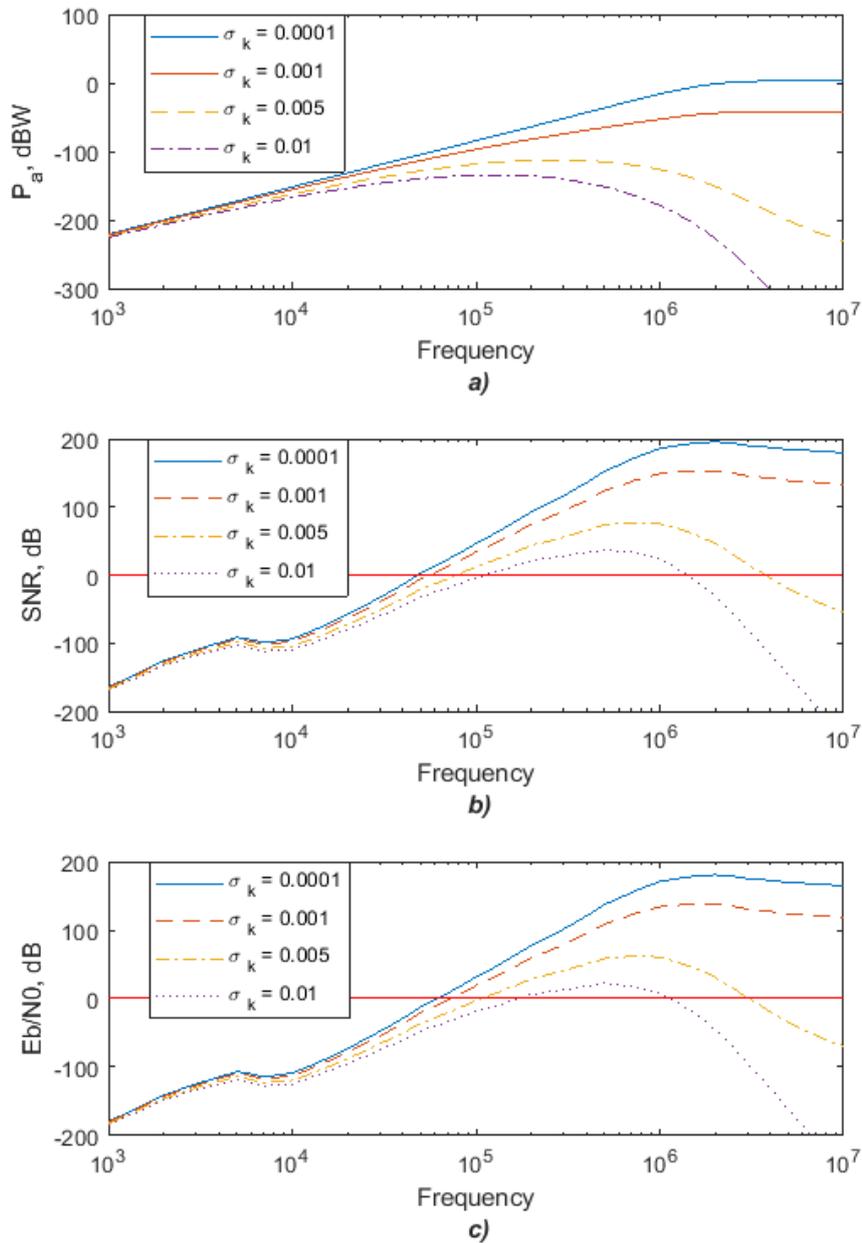


Рис. 5. Характеристики канала связи PSK31.

На рис. 7 приведен график зависимости SNR от частоты для восходящего канала голосовой связи с аналоговой модуляцией SSB для различных σ_k при $X = 100$ м, $D_1 = D_2 = 1$ дБ, КПД = 10 % и $B = 2500$ Гц ($10 \times \log_{10} B = 34$ в (14)).

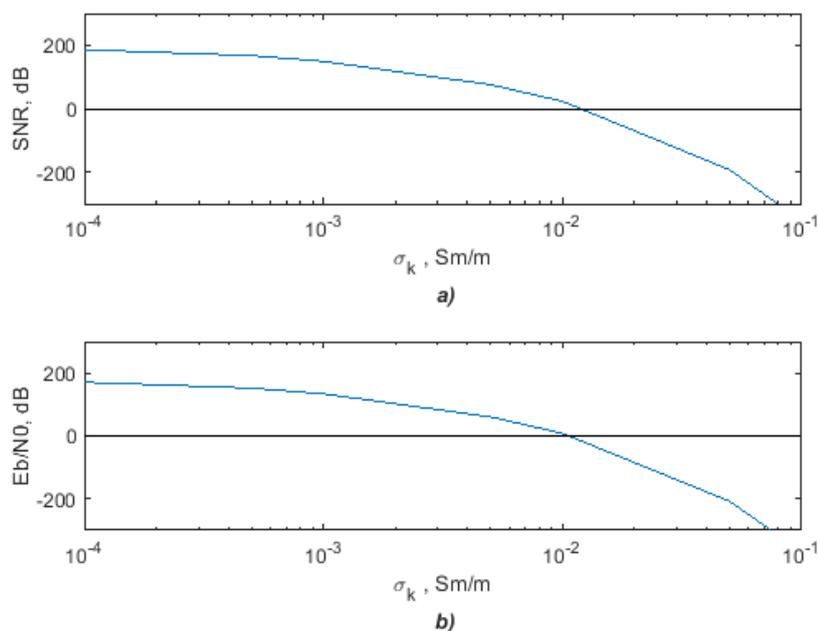


Рис. 6. Зависимости SNR и E_b/N_0 от электропроводности канала PSK31.

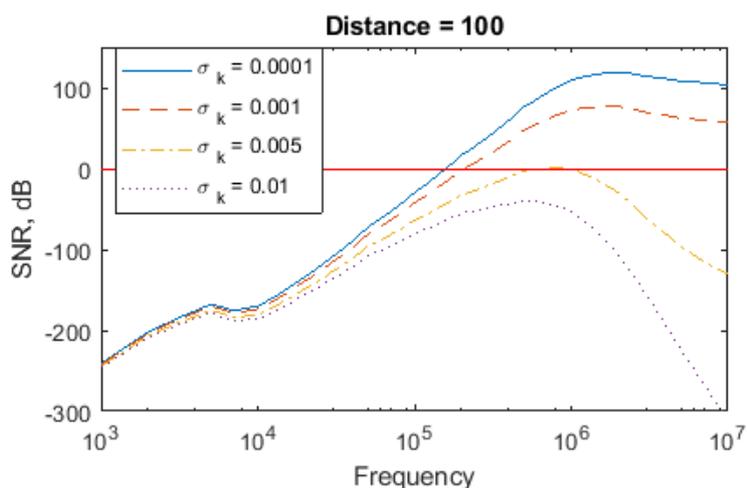


Рис. 7. Частотные зависимости SNR для различных значений электропроводности канала голосовой связи SSB

3. Обсуждение результатов

Сравнивая рис. 5 и 7, очевидно предсказуемое падение бюджета канала при использовании аналоговой модуляции для голосовой связи относительно канала передачи текстовых сообщений. При этом, в диапазоне значений $\sigma_k > 0.005$ См/м канал голосовой связи пропадает, тогда как канал текстовых сообщений сохраняется. Отметим, что наличие оптимальных частот уже отмечалось, в

частности, в [25] показано наличие оптимальных частот при анализе ослабления в радиолиниях диапазона от 10^4 до 10^6 Гц, подтверждённое экспериментально при прохождении СВ сигнала вдоль выработок без направляющих на шахтах Крайнего Севера. В настоящей статье полученные результаты являются следствием более общего подхода.

Таким образом, одним из ключевых факторов, влияющим на бюджет канала связи, является КПД антенн на приёмной и передающей сторонах. Суммарный вклад КПД двух антенн в бюджет радиолинии сопоставим с вкладом потерь на распространение в полупроводящей среде и даже превышает его на низких частотах.

Стоит отметить, что используемые сейчас для нисходящего канала антенны СДВ с размерами в сотни и тысячи метров формируют поля в горной породе, по каждой из пространственных компонент имеющие сложное распределение, сильно отличное от плоских волн. Использование СДВ имеет некоторые недостатки: фактически нулевую эффективность антенных устройств, сильную зависимость уровня сигнала от ориентации приёмной и передающей антенн между собой. Столь низкая эффективность СДВ антенных устройств даже при очень высоких габаритах и при организации связи ближнем полем приводит к необходимости использовать сотни и тысячи Вт для организации нисходящего канала. Использование малогабаритных антенн диапазона СВ на расстояниях порядка 100 метров предполагает не связь ближним реактивным полем, а связь полем излучения в ближней и промежуточной зоне излучения антенны.

В случае антенн, расположенных непосредственно возле стены горной выработки (или непосредственной на поверхности грунта/почвы), допустимо пренебрегать эффектом отражения ЭМВ от границы раздела сред, поскольку габариты антенны гораздо меньше длины волны. Также, в связи с тем, что используются сигналы с относительно узким спектром, в данной статье не учитываются дисперсионные свойства среды распространения. Для аналоговой

модуляции SSB ширина полосы на частоте 1 МГц составляет 2,5 кГц, из-за чего допустимо пренебречь разницей в ослаблении спектральных составляющих.

Заключение.

Характер падения КПД антенн с уменьшением частоты и, в противоположность этому, уменьшение потерь в полупроводящей среде, приводят к возникновению оптимальных частот для радиосвязи в горных выработках, зависящих от протяженности радиотрассы и электрофизических характеристик среды. В большинстве случаев между соседними горизонтами, как правило, несколько десятков метров, по этой причине в статье была проанализирована радиотрасса протяженностью 100 м, для которой оптимальные частоты лежат в диапазоне от 300 до 2000 кГц. Показано, что двусторонняя передача текстовых сообщений сохраняется для породы с электропроводностью σ_k от 10^{-4} до 10^{-2} См/м, а при σ_k менее 0,005 См/м

сохраняется двухсторонняя голосовая связь.

Из проведенного анализа бюджета подземного канала беспроводной связи следует, что помимо известного способа односторонней организации связи, основанного на развертывании крупногабаритных антенн диапазона СДВ с радиостанциями большой мощности, имеется весьма эффективный и перспективный способ организации двухсторонней связи с использованием портативных радиостанций диапазона СВ мощностью до 6 Вт с малогабаритными антеннами не более 1,5 метров. Такое радиооборудование может использоваться как портативное, так и быть установлено в стационарных пунктах связи и в пунктах коллективного спасения персонала шахт и горных выработок.

Литература

1. Трубецкой К.Н. Состояние и основные направления освоения ресурсов земных недр. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2020. №3. С.8-15. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-3-8-15> .
2. Корчагин Ю.А., Саломатов В.П., Чернов А.А. Радиосвязь в проводящих средах. Новосибирск, Наука. 1990. 148 с.
3. Yarkan S., Guzelgoz S., Arslan H., Murphy R. Underground mine communications: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2009. Vol.11. No.3. P.125-142. <https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090309>.
4. Forooshani A.E., Bashir S., Michelson D.G., Noghianian S. A survey of wireless communications and propagation modeling in underground mines. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2013. Vol.15. No.4. P.1524-1545. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.031413.00130>.
5. Yan L., Zhou Ch., Reyes M., Whisner B., Damiano N. Mathematical modeling and measurement of electric fields of electrode-based through-the-earth (TTE) communication. Radio Science. 2017. Vol.52. No.6. P.731-742. <https://doi.org/10.1002/2016RS006242>.
6. Yan L., Waynert J.A., Sunderman C. Measurements and modeling of through-the-earth communications for coal mines. IEEE Transactions on industry applications. 2013. Vol.49. No.5. P.1979-1983. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2260116>.
7. Damiano N., Yan L., Whisner B., Zhou Ch. Simulation and measurement of through-the-earth, extremely low-frequency signals using copper-clad steel ground rods. IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. Vol.53. No.5. P.5088-5095. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2703625>.
8. Liu Y., An Zh., Wang Q., Pan R., Liu X., Liu J. Research on intrinsic-safe through-the-earth radio communication system technology with large depth. 2020 12th International Conference on Communication Software and Networks. 12-15 June 2020. <https://doi.org/10.1109/ICCSN49894.2020.9139108>.

9. Carreno J.P., Silva L.S., Almeida Nevis S.O., Aguayo L., Braga A.J., Barreto A.N., Uzeda Garcia L.G. Through-the-Earth (TTE) communications for underground mines. *Journal of Communication and Information Systems*. 2016. Vol.31. No.1. P.164-176. <https://doi.org/10.14209/jcis.2016.15>.
10. Carreno J. P., Barreto A.N., Braga J. Propagation loss and apparent conductivity models for Through-the-Earth communication in sedimentary soil. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2019. Vol.13. No.9. P.1382-1388. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2018.5793>.
11. Shaydurov G.Y., Kudinov D.S., Kokhonkova E.A., Shchitnikov A.A. Through-the-Earth communication in underground mines by electromagnetic waves. 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 12-14 May 2016. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2016.7491771>.
12. Kutta Radios - Technology Overview [online]. Дата обращения: 06.09.2021. URL: <https://www.kuttaradios.com/index.html>.
13. Радиосистема «КИС-1» [online]. Дата обращения: 06.09.2021. URL: http://www.mobilradio.ru/radios/vebr/?vebr_kis-1.
14. Аппарат высокочастотной горноспасательной связи «Кварц-3М» [online]. Дата обращения: 06.09.2021. URL: http://promimpex.su/index/kvarc_3m/0-46.
15. FERRA L1 – компактная средневолновая радиостанция для подземной и наземной радиосвязи [online]. Дата обращения: 06.09.2021. URL: <http://xferra.ru/products/ferra-11/ferra-11.php>.
16. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. Теория передачи сигналов: учебник для вузов. Москва, Связь. 1980. 288 с.
17. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Москва, Издательский дом «Вильямс». 2007. 1104 с.
18. Balanis C.A. *Antenna theory. Analysis and Design*. John Wiley & Sons Inc. 2016. 1072 p.

19. Fedosov D.V., Kolesnikov A.V., Nikolaev A.V., Starchenkov A.V., Titovets P.A. Calorimetric method for measurement of electrically small antennas efficiency. 2021 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications, conference proceedings, 16-18 March 2021. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF51389.2021.9416092>
20. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. Москва, Наука. 1965. 164 с.
21. Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н., Финкельштейн М.И. Подповерхностная радиолокация. Москва, Радио и связь. 1994. 216 с.
22. Под ред. Хмелевского В.К., Бондаренко В.М. Электроразведка. Москва, Недра. 1989. 438 с.
23. Zhang H., Zhu M., Li X., Han W., Liu Zh. Very low frequency propagation characteristics analysis in coal mines. IEEE Access. 2020. Vol.8. P.95483-95490. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2995678>.
24. Рекомендация МСЭ-R P.372-11. Радишум [online]. Международный союз электросвязи. Дата обращения: 06.09.2021. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-11-201309-S!!PDF-R.pdf.
25. Кореннов Б.И. Исследование условий распространения радиоволн на шахтах Севера и разработка аппаратуры шахтной связи. Якутск, Институт горного дела Севера. 1983. URL: <https://www.dissercat.com/content/issledovanie-uslovii-rasprostraneniya-radiovoln-na-shakhtakh-severa-i-razrabotka-apparatury->

Для цитирования:

Федосов Д.В., Николаев А.В., Колесников А.В. Бюджет подземного канала беспроводной связи сквозь горную породу. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.11>