

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.87

КОМПЕНСАЦИЯ ИНДУСТРИАЛЬНОЙ ПОМЕХИ ПРИ ПРИЕМЕ СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МОРЕ

© 2020 г. В. Г. Максименко*

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация*

**E-mail: max54@ms.ire.rssi.ru*

Поступила в редакцию 24.10.2018 г.

После доработки 13.03.2019 г.

Принята к публикации 18.03.2019 г.

Показана возможность компенсации индустриальной помехи, создаваемой электроустановками буксирующего корабля при приеме сверхнизкочастотного электромагнитного поля в море. Предложено приемное устройство с буксируемым кабельным электродным датчиком, использующее компенсацию индустриальной помехи. Показано, что применение компенсации индустриальной помехи позволяет существенно уменьшить длину кабельного электродного датчика.

DOI: 10.31857/S0033849420020138

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное поле сверхнизкочастотного (СНЧ) диапазона (30...300 Гц) способно, хотя и с большим затуханием, проникать из атмосферы в морскую воду на глубину до сотен метров, поэтому применяется для осуществления радиосвязи с глубокопогруженными подводными объектами [1–3]. При этом возникает необходимость приема слабого узкополосного сигнала на фоне значительных помех. Электрическое поле электромагнитной волны в морской воде, являющейся проводящей средой, порождает токи проводимости. Последние создают между двумя точками среды разность потенциалов, которая может быть измерена с помощью электродного датчика электрического поля. Электродный датчик представляет собой два разнесенных на некоторое расстояние электрода, имеющих электрический контакт с окружающей морской водой.

Электродный датчик для приема электромагнитного СНЧ-поля в море, описанный в [4], выполнен в виде двух металлических электродов, установленных на жесткой диэлектрической платформе на расстоянии порядка одного метра друг от друга. Платформа с датчиком и предварительным усилителем с помощью кабель-троса буксируется за кораблем на заданной глубине. Выходное напряжение с предварительного усилителя по кабелю передается на приемный блок, установленный на судне. Недостатком такого датчика является невысокая чувствительность, что обусловлено небольшим расстоянием между электродами при большом уровне так называемого “шума движе-

ния”, т.е. шума электродного датчика, обусловленного его движением в морской среде [4].

Для повышения чувствительности применяют кабельный электродный датчик (кабельную антенну) [1]. Он выполнен в виде двух металлических электродов, установленных на буксируемом за кораблем гибком кабеле, которые с помощью проводов кабеля соединены с приемником, установленным на борту корабля. При буксировке кабельная антенна находится на некоторой глубине практически параллельно водной поверхности. Электромагнитная волна, распространяющаяся из атмосферы вглубь моря, также имеет плоский фронт, параллельный поверхности воды. В СНЧ-диапазоне длина волны в атмосфере составляет несколько тысяч километров, поэтому ко всем точкам кабельной антенны волна приходит с одинаковой фазой и амплитудой. Напряжение сигнала, принимаемого датчиком, $U_C = E_C l$ пропорционально расстоянию между электродами l , т.е. длине активной части кабельной антенны, и напряженности электрического поля E_C . Для достижения требуемой чувствительности при глубине погружения более 100 м расстояние между электродами составляет 200...300 м.

Кабельную антенну буксирует подводный объект, с которым и осуществляется радиосвязь. Электроустановки, расположенные на борту подводного объекта, создают переменные магнитные поля, возбуждающие в морской воде переменное электрическое поле индустриальной помехи. Спектр частот индустриальной помехи перекрывается со спектром принимаемого сигнала. Для

уменьшения индустриальной помехи до приемлемого уровня активную часть кабельной антенны располагают так, чтобы ближний электрод находился от корабля на расстоянии 200...300 м. При этом общая длина кабельной антенны достигает 600 м. Столь большие габариты антенны являются недостатком, создающим проблемы при ее эксплуатации.

Цель работы — показать возможность компенсации индустриальной помехи и уменьшения длины кабельной антенны за счет укорочения ее пассивной части.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

В общем случае источник индустриальной помехи, в качестве которого обычно выступает силовое электрооборудование, создает негармоническое переменное магнитное поле, одна из гармоник которого близка по частоте к принимаемому сигналу, поэтому не может быть отфильтрована в приемнике. Источник индустриальной помехи на подводном объекте можно представить в виде рамки с переменным током. Возбуждаемая рамкой электромагнитная волна, распространяясь вдоль кабельной антенны, испытывает в морской воде сильное затухание. Поэтому напряженность электрического поля индустриальной помехи уменьшается по мере удаления от подводного объекта. У принимаемой же электромагнитной волны величина напряженности электрического поля полезного сигнала и фаза одинаковы во всех точках антенны. Это дает возможность осуществить компенсацию индустриальной помехи. Для получения компенсационного напряжения на пассивной части кабельной антенны, т.е. ближе к подводному объекту, устанавливают еще два электрода, образующие второй электродный датчик — компенсационный. Расстояние между электродами второго датчика может быть на порядок меньше, чем у первого, так как напряженность электрического поля индустриальной помехи здесь достаточно велика. Следовательно, и напряжение сигнала на втором датчике тоже на порядок меньше, чем на первом. После фазирования и уравнивания амплитуд компенсационное напряжение вычитают из напряжения, поступающего на приемный блок с первого датчика. Потери полезного сигнала при этом не превышают 10%. Зато длину пассивной части кабельной антенны можно уменьшить с 200...300 до 100 м и менее.

Представим источник индустриальной помехи в виде рамки площадью S с переменным током амплитудой I_m и круговой частотой ω . В направлении максимума диаграммы направленности комплексная амплитуда напряженности электри-

ческого поля на расстоянии r от центра рамки определяется выражением [6]:

$$\dot{E}_m = -\frac{i\omega\mu_0 I_m S}{4\pi} \left(\frac{1}{r^2} \exp(-ikr) + \frac{ik}{r} \exp(-ikr) \right), \quad (1)$$

где i — мнимая единица, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная, k — волновое число в морской воде.

Волновое число в проводящей среде является комплексной величиной $k = k' - ik''$, где $k' \approx k'' = 1/\Delta$. Здесь $\Delta = \sqrt{2/\omega\mu_0\sigma}$ — толщина скин-слоя. При стандартной проводимости воды в океане $\sigma = 4$ См/м и частоте $f = 75$ Гц (такая частота использовалась в экспериментах по проекту “Сангвин” в США [1]) толщина скин-слоя составляет 29 м. Теперь выражение (1) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \dot{E}_m &= -\frac{i\omega\mu_0 I_m S}{4\pi\Delta r} \left(1 - i \left(1 + \frac{\Delta}{r} \right) \right) \exp\left(-\frac{r}{\Delta}\right) \exp\left(-\frac{ir}{\Delta}\right) = \\ &= \frac{i\omega\mu_0 I_m S}{4\pi\Delta r} \sqrt{1 + \left(1 + \frac{\Delta}{r} \right)^2} \exp\left(-\frac{r}{\Delta}\right) \times \\ &\quad \times \exp\left(-i \left(\frac{r}{\Delta} + \arctg \left(1 + \frac{\Delta}{r} \right) \right) \right). \end{aligned} \quad (2)$$

С ошибкой, не превышающей 0.5%, в диапазоне r от 75 до 400 м точные выражения можно аппроксимировать более простыми приближениями:

$$\begin{aligned} \sqrt{1 + \left(1 + \frac{\Delta}{r} \right)^2} &\approx 1.4 + 0.8 \frac{\Delta}{r}, \\ \arctg \left(1 + \frac{\Delta}{r} \right) &\approx 0.79 + 0.4 \frac{\Delta}{r}. \end{aligned}$$

В результате для комплексной амплитуды напряженности электрического поля индустриальной помехи получаем выражение

$$\begin{aligned} \dot{E}_m &= \frac{\omega\mu_0 I_m S}{4\pi r \Delta} \left(1.4 + 0.8 \frac{\Delta}{r} \right) \exp\left(-\frac{r}{\Delta}\right) \times \\ &\quad \times \exp\left(-i \left(\frac{r}{\Delta} + 0.4 \frac{\Delta}{r} + 0.79 \right) \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Переходя от комплексной амплитуды к функции времени, получим

$$\begin{aligned} E(r, t) &= \frac{\omega\mu_0 I_m S}{4\pi r \Delta} \left(1.4 + 0.8 \frac{\Delta}{r} \right) \exp\left(-\frac{r}{\Delta}\right) \times \\ &\quad \times \cos\left(\omega t - \left(\frac{r}{\Delta} + 0.4 \frac{\Delta}{r} + 0.79 \right) \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, напряженность электрического поля индустриальной помехи при увеличении расстояния r уменьшается и приобретает фазовый сдвиг.

Косинус в выражении (4) удобно представить в виде

$$\begin{aligned} & \cos\left(\omega t - \left(\frac{r}{\Delta} + 0.4 \frac{\Delta}{r} + 0.79\right)\right) = \\ & = \cos\left(\frac{r}{\Delta} + 0.4 \frac{\Delta}{r} + 0.79\right) \cos \omega t + \\ & + \sin\left(\frac{r}{\Delta} + 0.4 \frac{\Delta}{r} + 0.79\right) \sin \omega t. \end{aligned} \quad (5)$$

Напряжение промышленной помехи между электродами кабельной антенны, находящимися на расстояниях r_1 и r_2 от центра рамки с током, определяется интегралом

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E(r, t) dr. \quad (6)$$

С учетом (4)–(6) получим

$$\begin{aligned} U = & \frac{\omega \mu_0 I_m S}{4\pi} \times \\ & \times \left(\left(\frac{1.4}{\Delta} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} \exp\left(-\frac{r}{\Delta}\right) \cos\left(\frac{r}{\Delta} + 0.4 \frac{\Delta}{r} + 0.79\right) dr + \right. \right. \\ & + 0.8 \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2} \exp\left(-\frac{r}{\Delta}\right) \cos\left(\frac{r}{\Delta} + 0.4 \frac{\Delta}{r} + 0.79\right) dr \Big) \cos \omega t + \\ & + \left(\frac{1.4}{\Delta} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} \exp\left(-\frac{r}{\Delta}\right) \sin\left(\frac{r}{\Delta} + 0.4 \frac{\Delta}{r} + 0.79\right) dr + \right. \\ & \left. \left. + 0.8 \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2} \exp\left(-\frac{r}{\Delta}\right) \sin\left(\frac{r}{\Delta} + 0.4 \frac{\Delta}{r} + 0.79\right) dr \right) \sin \omega t \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Вычислим напряжение промышленной помехи на компенсационном датчике при значениях r_1 и r_2 соответственно 90 и 100 м:

$$\begin{aligned} U_1 = & \frac{\omega \mu_0 I_m S}{4\pi} \times 10^{-5} (-11.6 \cos \omega t - 19.5 \sin \omega t) \approx \\ & \approx -22.7 \times 10^{-5} \frac{\omega \mu_0 I_m S}{4\pi} \sin(\omega t + 0.54). \end{aligned} \quad (8)$$

Напряжение промышленной помехи на активной части кабельной антенны, электроды которой расположены на расстояниях $r_1 = 100$ м и $r_2 = 400$ м, вычислим по формуле

$$\begin{aligned} U_2 = & \frac{\omega \mu_0 I_m S}{4\pi} \times 10^{-5} (9.4 \cos \omega t - 30.3 \sin \omega t) \approx \\ & \approx -31.8 \times 10^{-5} \frac{\omega \mu_0 I_m S}{4\pi} \sin(\omega t - 0.3). \end{aligned} \quad (9)$$

В соответствии с (8) и (9) напряжение на компенсационном датчике представляет собой гармоническое колебание, которое по амплитуде в 1.4 раза меньше напряжения помехи на активной части кабельной антенны, а по фазе — на 0.84 рад его опережает. Это означает возможность ком-

пенсации (вычитания) промышленной помехи при уравнивании амплитуд и фаз, причем можно использовать только три электрода, электроды третий и четвертый можно объединить. То есть электрод на отметке 100 м можно использовать как для приема сигнала, так и для получения компенсирующего напряжения. Общая длина кабельной антенны составляет 400 м.

Оценим уменьшение полезного сигнала после компенсации помехи. Напряжение полезного сигнала, регистрируемое на активной части кабельной антенны длиной l_1 , запишем в виде

$$U_{C1} = E_C l_1 = U_m \sin \omega t,$$

а напряжение сигнала, поступающее для вычитания с компенсационного датчика, с учетом его длины $l_2 = 0.1 l_1$ и уравнивания амплитуд и фаз помехи, — в виде

$$U_{C2} = E_C l_2 = 0.14 U_m \sin(\omega t - 0.84).$$

После вычитания получаем

$$U_{C1} - U_{C2} = 0.912 U_m (\sin \omega t + 0.115).$$

Следовательно, уменьшение напряжения принимаемого сигнала составляет менее 9%.

2. ПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО

Приемное устройство, реализующее компенсацию промышленной помехи, изображено на рис. 1. Оно содержит четырехжильный гибкий кабель К, первый 1 и второй 2 электроды, образующие первый датчик электрического поля (активную часть кабельной антенны), третий 3 и четвертый 4 электроды, образующие второй (компенсационный) датчик электрического поля, предварительный усилитель ПУ, первый узкополосный фильтр УФ1, второй узкополосный фильтр УФ2, управляемый усилитель УУ, управляемый фазовращатель ФВ, блок вычитания БВ, приемный блок ПБ и блок экстремального регулирования БЭР.

Устройство работает следующим образом. Напряжение, регистрируемое на электродах 1 и 2, усиливается предварительным усилителем ПУ и через второй узкополосный частотный фильтр УФ2 поступает на первый вход блока вычитания БВ. Фильтр УФ2 пропускает узкую полосу частот в окрестностях несущей частоты принимаемого сигнала (в нашем случае это частота 75 Гц). Напряжение, регистрируемое на электродах 3 и 4, через последовательно включенные первый узкополосный частотный фильтр УФ1, управляемый усилитель УУ и управляемый фазовращатель ФВ, поступает на второй вход блока вычитания БВ. Первый и второй узкополосные фильтры идентичны, их полоса пропускания согласована со спектром принимаемого сигнала. Применение

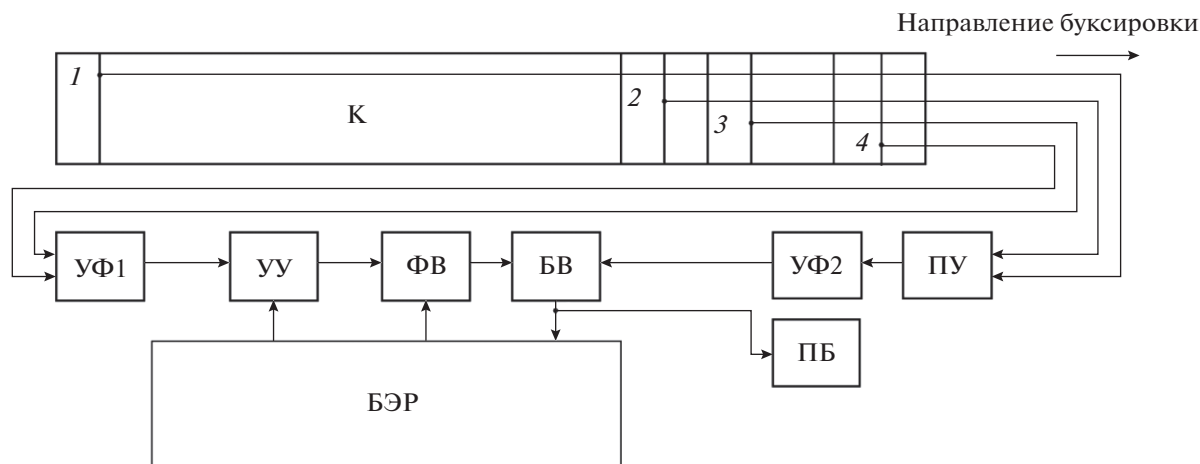


Рис. 1. Схема приемного устройства: К — четырехжильный гибкий кабель, 1–4 — первый, второй, третий и четвертый электроды, ПУ — предварительный усилитель, УФ1, УФ2 — первый и второй узкополосные фильтры, УУ — управляемый усилитель, ФВ — управляемый фазовращатель, БВ — блок вычитания, ПБ — приемный блок, БЭР — блок экстремального регулирования.

узкополосных фильтров позволяет гармонизировать помеху, т.е. превратить ее в напряжение с фиксированной частотой, что дает возможность осуществить компенсацию. В частности, осуществить фазирование помехи, поступающей на вычитание от активной части кабельной антенны и компенсационного датчика, так как поворот фазы в управляемом фазовращателе обычно зависит от частоты. С выхода блока вычитания БВ напряжение поступает на приемный блок ПБ и на вход блока экстремального регулирования БЭР, первый и второй выходы которого соединены соответственно с управляющими входами управляемого усилителя и управляемого фазовращателя.

Блок экстремального регулирования вырабатывает напряжения, управляющие коэффициентом усиления управляемого усилителя и поворотом фазы управляемого фазовращателя до достижения минимального значения напряжения на выходе блока вычитания. На его выходе остается напряжение сигнала с помехами естественного происхождения и промышленные помехи, скомпенсировать которые не удастся. Приемный блок осуществляет дополнительное усиление, частотную фильтрацию принимаемого сигнала и выделение полезной информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе теоретического анализа предложено приемное устройство, осуществляющее компенсацию промышленной помехи. Вследствие этого нет необходимости удалять активную часть антенны на сотни метров от подводного объекта. Это дает возможность уменьшить общую длину кабельной антенны на 200 м, что существенно улучшает ее эксплуатационные характеристики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность В.В. Хабарову за помощь в вычислениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн С.Л., Барроуз М.Л., Эванс Дж.Э. и др. // ТИИЭР. 1974. Т. 62. № 3. С. 5.
2. Связь и АСУ Военно-Морского Флота: юбилейное издание. М.: Информационный мост, 2005.
3. Роль российской науки в создании отечественного подводного флота. М: Наука, 2008.
4. Максименко В.Г., Нарышкин В.И. // РЭ. 2003. Т. 48. № 1. С. 70.
5. Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б., Яровой Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Радиотехника, 2007.