

# Сферические волны передающих линейных магнитных антенн (Часть II)

Радиоинженер, Кандидат физ.- мат. наук, Ph.D.  
Арий Борисович Ляско

1. Настоящая работа посвящена возможности использования передающих линейных магнитных антенн (ЛМА) для электромагнитной цифровой связи в ОНЧ и КНЧ диапазоне между мобильными погруженными в морскую среду объектами и об особенностях работы Передающей Линейной Ферритовой Антенны (ПЛФА) типа ЛМА [1, 2, 3].

Типичными представителями ПЛФА являются модели Передающих Линейных Магнитных Антенн ПЛМА, изложены в Описаниях Патентов [1, 2] и статье [3]: "*Сферические волны передающих Линейных Магнитных Антенн(часть I)*" автора настоящей работы.

Ознакомиться с некоторыми моделями ПЛМА, материалами лабораторных испытаний и используемыми измерительными приборами можно на сайте [www.lret.ru](http://www.lret.ru).

В настоящей работе автор в отличие от статьи [3], где рассматривалась теория работы ПЛМА в свободном пространстве (в вакууме), иллюстрирует теоретические основы применения ПЛМА в поглощающих и проводящих средах.

*ПЛМА - как излучатели электромагнитных волн типа Магнитного Диполя Герца (МГД), собственно предназначены быть используемыми преимущественно в СДВ диапазоне, а именно, в ОНЧ (3 КГц - 30 КГц), КНЧ (30 Гц - 3000 Гц) и НЧ (3 КГц - 80 КГц) диапазонах частот в поглощающих средах с удельным сопротивлением  $\Omega$  среды менее 40 Ом м, включая морскую воду, для которой  $\Omega = 0.3$  Ом м.*

*С "Радиотехнической" точки зрения в среде, для которой относительные величины магнитной  $\mu_r$  и электрической  $\epsilon_r$  проницаемости отличны от единицы*

можно было утверждать, что "Волновое сопротивление"  $W$  в такой среде будет иметь

$$W = W_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (1 - 1), \quad \text{где} \quad W_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \pi 120 \text{ Ом} = 377 \text{ Ом.} \quad (1 - 2),$$

значение: (1 - 1), где (1 - 2), а длина волны казалось бы

можно было бы вычислять по формуле  $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$  (1 - 3),

где  $\lambda$ ,  $\lambda_0$  - соответственно длина волны в среде и длина волны в вакууме.

$W_0$  - Волновое сопротивление вакуума.  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума,

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Генри / м (1 - 3),  $\epsilon_0 = 1/36\pi 10^9$  Фарад / м (1 - 4)

Например, при нахождении в морской среде  $\mu_r = 1$  (1 - 5),  $\epsilon_r = 81$  (1 - 6), поэтому можно считать, что  $W = 41.89$  Ом, (1 - 6), и можно было бы предположить, что  $\lambda = (\lambda_0 / 9)$  м (1 - 7).

Однако исследовании прохождения электромагнитных волн *несущей частоты  $f$*  в случае нахождения Передающей или Приёмной Линейной Электрической Антенн в реальной Земной среде геофизиками Компании "РАДИОНДА" [4] (подробную информацию о научно - технической деятельности их сотрудников можно ознакомиться на их сайте: [www.radionda.ru](http://www.radionda.ru)) и при объяснении ими применённого инновационного метода диагностики недр Земли были приведены: а) формула оценки длины волны *в среде, обладающей конечным значением величины  $\Omega$* :

$$\lambda = 2 \sqrt{\pi \Omega / f \mu} \quad (1 - 8).$$

и б) коэффициента затухания к амплитудных значений  $E_{\varphi m}$ ,  $H_{\rho m}$ ,  $H_{\theta m}$

$$k = \sqrt{\frac{\mu f}{\Omega}} \quad (1 - 9) \quad \text{при } 2\pi f \Omega \varepsilon < 1$$

Поэтому представляет интерес рассмотреть создаваемое находящейся погружённой в такого рода среду ПЛМА во круг себя электромагнитное поле.

Для анализа (см. **Изо. 1**) использованы [3] следующие выражения отыскания амплитудных значений электрической  $E_{\varphi m}$  и магнитных  $H_{\rho m}$ ,  $H_{\theta m}$  составляющих напряжённости электромагнитного поля, создаваемого моделью **ЛМА №21** с помощью выражений

$$E_{\varphi m} = -\frac{J_m I_m}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \left[ \left(\frac{\lambda}{2\pi\rho}\right)^2 + i \frac{\lambda}{2\pi\rho} \right] e^{-i\alpha\rho} e^{-k\rho} \cos\theta \quad (1 - 10)$$

$$H_{\rho m} = \frac{J_m I_m}{4\pi^2 \mu f} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 \left[ -i \left(\frac{\lambda}{2\pi\rho}\right)^3 + \left(\frac{\lambda}{2\pi\rho}\right)^2 \right] e^{-i\alpha\rho} e^{-k\rho} \sin\theta \quad (1 - 11)$$

$$H_{\theta m} = -\frac{J_m I_m}{8\pi^2 \mu f} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 \left[ -i \left(\frac{\lambda}{2\pi\rho}\right)^3 + \left(\frac{\lambda}{2\pi\rho}\right)^2 + i \frac{\lambda}{2\pi\rho} \right] e^{-i\alpha\rho} e^{-k\rho} \cos\theta \quad (1 - 12),$$

где  $\alpha = 2\pi/\lambda$  (1 - 13),  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$  (1 - 14), где

$J_m$  - "Магнитный ток" протекаемый в теле ПЛМА, [В];

$\lambda$  - длина волны поглощающей среды в которую погружена модель ПЛМА, [м];

$k$  - коэффициент затухания в среде конечном значении величины  $\Omega$  [Ом м] в [1/м];

При рассмотрении затухания плоской моно гармоничной электромагнитной волны частоты  $f$  с помощью **Уравнений Максвелла** в среде с значением  $\Omega$  (в частности, для морской среды при температуре  $25^0$  С  $\Omega = 0.3$  Ом м) оценка величины  $h$  толщины слоя затухания в  $e$  - раз амплитудного значения электрической  $E$  [В/м] и магнитной  $H$  [А/м] составляющих напряженностей электромагнитного поля может быть вычислена по формуле, любезно представленной доцентом, кандидатом физ. - мат. наук Павлом Юрьевичем Пушкарёвым (подробнее о нём - [www.spectra-geo.narod.ru/CV\\_Ru.htm](http://www.spectra-geo.narod.ru/CV_Ru.htm))

$$h[\text{м}] = \sqrt{\frac{10^7 \Omega [\text{Ом.м}]}{f [\text{Гц}]}} \quad (1 - 15),$$

где  $h[\text{м}]$  - слой затухания составляющей Напряжённости Магнитного  $H$  [А/м] или Электрического  $E$  [В/м] электромагнитного поля в 2.71 раз.

Поэтому  $E(\rho, f) = E(0, f) e^{-(\rho/h)}$  (1 - 10), и соответственно,

$$H(\rho, f) = H(0, f) e^{-(\rho/h)} \quad (1 - 11),$$

где  $\rho$  [м] - расстояние до приёмного устройства от места расположения ПЛМА.

По Ю.П. Пушкарёву коэффициент затухания к электрической  $E_{\varphi m}$  и магнитных  $H_{\rho m}$ ,  $H_{\theta m}$  компонент электромагнитного поля [1/м]:

$$k = \frac{1}{h} \quad (1 - 12)$$

С учётом  $\mu f = W/\lambda$  (1 - 12)

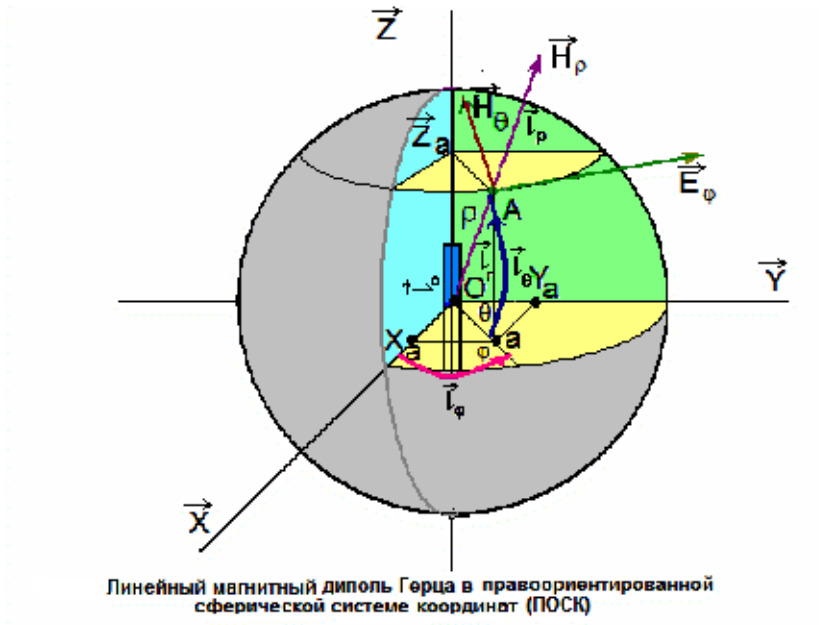
выражения (1 - 10, 11, 12) принимают вид [3]:

$$E_{\varphi m} = -\frac{J_m l_m}{4\pi\rho^2} (1+i\alpha\rho) e^{-i\alpha\rho} e^{-k\rho} \cos\theta \quad (1-13)$$

$$H_{\theta m} = \frac{J_m l_m \lambda_0}{4\pi^2 W \rho^2} (-i + \alpha\rho) \frac{1}{\rho} e^{-i\alpha\rho} e^{-k\rho} \sin\theta \quad (1-14)$$

$$H_{\varphi m} = -\frac{J_m l_m \lambda_0}{8\pi^2 W \rho^2} (-i + i\alpha\rho + (\alpha\rho)^2) \frac{1}{\rho} e^{-i\alpha\rho} e^{-k\rho} \cos\theta \quad (1-15), \text{ где}$$

$$e^{-i\alpha\rho} = \cos\alpha\rho - i\sin\alpha\rho \quad (1-16).$$



Изо.1.

2. Как было отмечено в [3] данная модель ЛМА №21



Фото 1. На переднем плане вид модели ЛМАН№21 и модель резонансный конденсатора для частоты 30 КГц, рассчитанные для работы при  $I_{ам}$  до 8 А [3] .

до настоящего момента проходит испытания у геофизиков Компании "Радионда" совместно с

приёмной ферритовой антенной **MANo2**.

*В Феврале 2016 г* сотрудниками Компании "Радионда" были погружены в герметичных корпусах передающей и приёмных антенн оборудования Компании геофизиков "Радионда" Модель **ЛМАНo21** и Модель **MANo2** в две, расположенные на расстоянии  $\rho = 17.5$  м (2 - 1)

друг от друга, вертикальные скважины на глубину до **18 м**. При этом они погружались синхронно вертикально друг против друга с заданным шагом с помощью специальных устройств "опускания - подъёма" *на полигоне Геофизического Факультета МГУ в Московской области* с заранее известными свойствами слоёв пород грунта на заданной глубине.

В полученном Отчёте Компанией "ЛРЭТ" (данных испытаний Моделей **ЛМА No21** и **MANo2** на частоте **29550 Гц**), в частности, при нахождении на глубине **12 м** друг относительно друга *указаны электрические характеристики породы грунта:*

$\epsilon_r = 10$ ,  $\mu_r = 1$ ,  $\Omega = 20$  Ом м (2 - 2), и что для частоты  $f = 30$  КГц в данной среде длина волны  $\lambda = 81.36$  м (3 - 3), а коэффициент поглощения  $k = 0.077$  (2 - 4) при значении  $I_{am}$  тока возбуждения продольного магнитного поля в теле **ЛМА No21**, поданного на обмотку его соленоида, на частоте **29550 Гц**:  $I_{am} = 0.62$  А (2 - 5)

Использование формулы (1 - 9) дало значение  $k = 0.0769$  (2 - 6).

На выходе пассивной модели **MANo2** был зарегистрирован моно гармоничный сигнал частоты **30 КГц** со значением напряжения  $U_{твых} = 5039$  мкВ (2 - 6).

Поскольку была Приёмная Ферритовая Антенна **MANo2** обёрнута ими тонкой металлической фольгой, как они считают - входной контур, используемого ими предусилителя приёмного устройства, обладал добротностью  $Q = 3$  (2 - 7), поэтому они считают, что был зарегистрирован **MANo2** сигнал  $U_{MANo2} = 1680$  мкВ (2 - 8).



**Фото. 2.** Модель **MANo2** в герметичном кожухе, а выше справа Рамочная приёмная антенна **ЛАНo1** ( $A_{эфф} = 0.25$  кв.м,  $N=100$  витков).

Как было отмечено в [3] формула для расчета значения "Действующей высоты"  $H_{эфф}$  [м]

Приёмной Рамочной **ЛАНo1**:

$$H_{эфф} = \frac{2\pi A_{эфф} N}{\lambda}$$

(2 - 9) В свободном пространстве (вакууме) для частоты **29550 Гц**  $\lambda_0 = 10150.3$  м (2 - 10), а в упомянутой среде испытания антенн **ЛМАНo21** и **MANo2** длина волны, вычисленная по формуле (1 - 8),  $\lambda = 82.27$  м (2 - 10)

Поэтому для Антенны ЛАН№1 при длине  $\lambda_0 = 10150.3$  м  $H_{ЛАН№1эфф} = 0.0155$  м (2 - 11),

а при  $\lambda = 82.27$  м  $H_{ЛАН№1эфф} = 1.91$  м (2 - 12).

Измерения автора показали, что в отсутствии магнитопровода на частоте  $f = 1$  КГц индуктивность обмотки соленоида ЛМАН№ 21  $L_0 = 10.27$  мкГн (2 - 13), а в присутствии магнитопровода внутри тела ЛМАН№21 на частоте 29550 Гц - индуктивность обмотки соленоида  $L_a = 541.6$  мкГн (2 - 14).

Это значит, что эффективное значение относительной величины магнитной проницаемости Модели ЛМАН№21  $\mu_{эфф} = 52.7$  (2 - 15)

Автором проводились измерения величины регистрации электромагнитного излучения Модели ЛМАН№21 одновременно с одного и того же места с расстояния 14 метров антеннами ЛАН№1 и МАН№2 с целью определения отношения величин их "Действующей высоты" для частоты 29550 Гц.

Измерения показали, что для  $\lambda_0 = 10150.3$  м  $H_{МАН№2эфф} = 0.017$  м (2 - 13), поэтому

для среды, в которой  $\lambda = 82.27$  м  $H_{МАН№2эфф} = 2.16$  м (2 - 14).

**3. Анализ работы модели ЛМАН№21 [3] в поглощающей среде на частоте 29550 Гц при  $\epsilon_r = 10$ ,  $\mu_r = 1$ ,  $\Omega = 20$  Ом м (3 - 1).**

С учётом основных данных для модели ЛМАН№ 21, указанных в статье автора [3], по формулам (1 - 13, 14, 15) с учётом значения  $\lambda$ , вычисленного на глубине 12 м (3 - 2) по формуле (1 - 8), и с учётом значения для коэффициента  $k$ , вычисленного по формуле (1 - 9) для расстояния  $\rho = 17.5$  м (3 - 3) между антенной ЛМАН№21 и МАН№2 для частоты 29550 Гц можно с помощью программы "MathCAD MathSoft, Inc." [5] рассчитать значение  $J_m$  и амплитудные значения  $E_{\phi m}$ ,  $H_{\rho m}$ ,  $H_{\theta m}$ .

Так как для данной среды а) вычисления по формуле (1 - 1) дают значение "Волнового сопротивления"  $W = 119.22$  Ом (3 - 4),

б) результат расчёта по формуле (1 - 9) коэффициента затухания  $k$ :  $k = 0.076$  [1/м] (3 - 5).

в) Расчёт коэффициента  $\alpha_g$  по формуле  $\alpha_g = 2\pi/\lambda$  (3 - 6):  $\alpha_g = 0.076$  [1/м] (3 - 7)

г) В момент резонанса на частоте  $f_0 = 29550$  Гц реактивное сопротивление  $X_a$  индуктивности обмотки соленоида ЛМАН№ 21  $L_a$  равно  $X_a = i2\pi f_0 L_a \mu_{эфф} = i100.56$  Ом (3 - 8)

д) тесты антенного контура последовательного резонанса показали, что было получено значение полосы пропускания  $BW = 557.5$  Гц (3 - 9) на уровне - 3 дБ, поэтому Эффективное значение добротности  $Q_{эфф} = f_0 / BW = 53$  (3 - 10).

е) Ёмкость  $C$  резонансного конденсатора контура антенного тока  $I_{ам} = 0.62$  А (2 - 5) "возбуждения" продольного магнитного потока ЛМАН№21 определяется как:

$$C = 1/4\pi^2 f_0^2 L_a \quad (3 - 11) \quad C = 53.56 \text{ нФ} \quad (3 - 12).$$

ж) Амплитуда напряжения  $U_{ам}$  на обмотке соленоида ЛМАН№ 21 в момент резонанса:

$$U_{ам} = I_{ам} X_a = i 62.34 \text{ В} \quad (3 - 13).$$

з) Амплитудное значение циркулирующей вокруг боковой поверхности соленоида ЛМАН№21 напряжённости и электрического поля определяется как

$$E_{\phi m}(\rho = d_c : \theta = 0) = \frac{U_{ам}}{\pi d_c N} = i 11.25 \text{ В/м} \quad (3 - 14).$$

и) Амплитудное значение "магнитного тока"  $J_{ам}$  находят из равенства

$$J_{ам} = \frac{E_{эм}(U_{ам}, d_c, N)}{\frac{l_m}{4\pi} \left( \frac{1}{d_c^2} + i \frac{1}{\lambda_0 d_c} \right) e^{-i\alpha_c d_c}} = (-9.74 \cdot 10^{-6} + i 0.445) \text{ В} \quad (3 - 15)$$

Были получены следующие выражения для  $E_{\varphi m}$ ,  $H_{\rho m}$ ,  $H_{\theta m}$  для дистанции  $\rho=17.5$  м и  $\theta = 0$

$$E_{\varphi m}(\rho, \lambda, \alpha_{\xi}, k, \theta) = (1.59 \cdot 10^{-5} + i 7.6 \cdot 10^{-6}) \text{ В/м} \quad (3 - 16)$$

$$|E_{\varphi m}| = 17.6 \text{ мкВ/м} \quad (3 - 17).$$

$$H_{\theta m}(\rho, \lambda, \alpha_{\xi}, k, \theta) = (2.653 \cdot 10^{-5} + i 2.4 \cdot 10^{-7}) \text{ А/м} \quad (3 - 17)$$

$$|H_{\theta m}| = 26.53 \text{ мкА/м} \quad (3 - 18)$$

Естественно, что при  $\theta = 0$

$$|H_{\rho m}| = 0 \quad (3 - 19).$$

$$\text{Так как } H_{MAN\#2\text{эфф}} = 2.164 \text{ м, то } U1_{MAN\#2\text{вых}} = H_{MAN\#2\text{эфф}} |E_{\varphi m}| = 38 \text{ мкВ} \quad (3 - 19)$$

$$\text{и } U2_{MAN\#2\text{вых}} = |H_{\theta m}| W_{H_{MAN\#2\text{эфф}}} = 6.839 \text{ мВ} \quad (3 - 20)$$

#### 4. Заключение

1. Видим, что при  $\rho = 17.5$  м и  $\lambda = 82.27$  м для ЛМАН $\#$ 21 и МАН $\#$ 2, - как типичных представителя МГД в рассматриваемой среде, - вклад в значение напряжения, регистрируемое Приёмной магнитной или Рамочной антенной, играет лишь магнитная составляющая напряжённости поля, а не Электрическая составляющая потока электромагнитных волн и, что самое главное: в данной среде на данной дистанции происходит уже процесс излучения Моделью МА  $\#$ 21 электромагнитного поток, так как распространение сферических волн проходит (по крайней мере в месте регистрации) в так называемой "Дальней зоне" в силу выполнения условия  $\rho = 17.5 \text{ м} < (\lambda = 82.27 \text{ м}) / 2\pi = 13.1 \text{ м}$ .
2. Теоретическое значение для ЭДС = 6.84 мВ на выходе пассивной Модели Магнитной Антенны, условно названной МА  $\#$  2, чуть выше практически зарегистрированного ей значения в момент испытания геофизиками Компании "РАДИОНДА" [4] в скважинах Испытательного полигона Геофизического Факультета МГУ в реальных условиях в Феврале 2016 г. (см. Фото.3, любезно представленное автору по электронной почте).



**Фото. 3. Геофизики Компании "Радионда" в момент погружения антенных корпусов, в которых находятся Модель ЛМА № 21 и Модель МАН № 2 в скважины Испытательного полигона Геологического Факультета МГУ в Московской Области во время теста**

**Литература:**

1. **Arie Lyasko**"Теоретическое приложение и инженерный метод расчёта" US Patent 4458248 Jul.3.1984. "Parametric Antenna".
2. **А.Б. Ляско**, Описание изобретения, Патент РФ № 2428774 от 10 Сентября 2010 г., "Передающие Линейные Магнитные Антенны (ЛМА)".
3. **А.Б. Ляско**, "Сферические волны передающих Линейных Магнитных Антенн (Часть I)", "Евразийский Научный Журнал", № 6, 2016 г.
4. Труды геофизиков Компании "Радионда"( Например, "Канадская презентация" 2002 г., "Предварительный Отчёт испытаний в Феврале 2016 г.").
5. Программа "MathCAD, V. 7.0, MathSoft, Inc.