

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.

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 Ω 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 μ_r и электрической ϵ_r проницаемости отличны от единицы

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

$$W = W_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad W_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \pi 120 \text{ Ом} = 377 \text{ Ом.}$$

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 λ , λ_0 - соответственно длина волны в среде и длина волны в вакууме.

W_0 - Волновое сопротивление вакуума. μ_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 $W = 41.89 \text{ Ом}$, (1 - 6), и можно было бы предположить, что $\lambda = (\lambda_0 / 9) \text{ м}$ (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) и при объяснении ими применённого инновационного метода диагностики недр Земли были приведены: а) формула оценки длины волны **в среде, обладающей конечным значением величины Ω :**

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

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

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

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 напряжённостей 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];

λ - длина волны поглощающей среды в которую погружена модель ПЛМА, [м];

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

При рассмотрении затухания плоской моно гармоничной электромагнитной волны частоты f с помощью **Уравнений Максвелла** в среде с значением Ω (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 напряжённостей 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)

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

где $h[m]$ - 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 ρ [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)

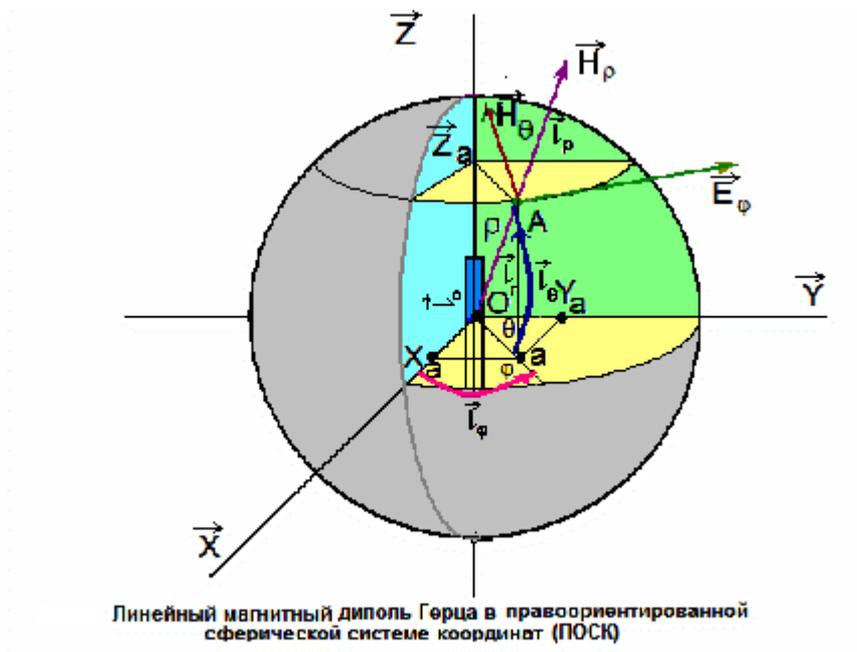
выражения (1 - 10, 11, 12) принимают вид [3]:

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

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

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

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



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 МАН^{№2}.

В Феврале 2016 г сотрудниками Компании "Радионда" были погружены в герметичных корпусах передающей и приёмных антенн оборудования Компании геофизиков "Радионда" Модель ЛМАН^{№21} и Модель МАН^{№2} 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 №21 и МАН^{№2} 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 $I_{ам}$ тока возбуждения продольного магнитного поля в теле ЛМА №21, поданного на обмотку его соленоида, на частоте 29550 Гц: $I_{ам} = 0.62$ А (2 - 5)

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

На выходе пассивной модели МАН^{№2} **был зарегистрирован моно гармоничный сигнал частоты 30 КГц со значением напряжения $U_{твых} = 5039$ мкВ (2 - 6).**

Поскольку была Приёмная Ферритовая Антенна МАН^{№2} 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 МАН^{№2} сигнал $U_{МАН\#2} = 1680$ мкВ (2 - 8).



Фото. 2. Модель MAN² в герметичном кожухе, а выше справа Рамочная приёмная антенна ЛАН¹ (Aэфф = 0.25 кв.м, N=100 витков).

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

Приёмной Рамочной ЛАН¹:

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

(2 - 9) В свободном пространстве (вакууме) для частоты 29550 Гц $\lambda_0 = 10150.3$ м (2 - 10), а в упомянутой среде испытания антенн ЛМАН²¹ и MAN² длина волны, вычисленная по формуле (1 - 8), $\lambda = 82.27$ м (2 - 10)

Поэтому для Антенны ЛАН¹ при длине $\lambda_0 = 10150.3$ м $H_{ЛАН¹эфф} = 0.0155$ м (2 - 11),

а при $\lambda = 82.27$ м $H_{ЛАН¹эфф} = 1.91$ м (2 - 12).

Измерения автора показали, что в отсутствии магнитопровода на частоте $f = 1$ КГц индуктивность обмотки соленоида ЛМАН² 21 $L_0 = 10.27$ мкГн (2 - 13), а в присутствии магнитопровода внутри тела ЛМАН²¹ на частоте 29550 Гц - индуктивность обмотки соленоида $L_a = 541.6$ мкГн (2 - 14).

Это значит, что эффективное значение относительной величины магнитной проницаемости Модели ЛМАН²¹ $\mu_{эфф} = 52.7$ (2 - 15)

Автором проводились измерения величины регистрации электромагнитного излучения Модели ЛМАН²¹ одновременно с одного и того же места с расстояния 14 метров антеннами ЛАН¹ и MAN² с целью определения отношения величин их "Действующей высоты" для частоты 29550 Гц.

Измерения показали, что для $\lambda_0 = 10150.3$ м $H_{MAN²эфф} = 0.017$ м (2 - 13), поэтому

для среды, в которой $\lambda = 82.27$ м $H_{MAN²эфф} = 2.16$ м (2 - 14).

3. Анализ работы модели ЛМАН²¹ [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 ЛМАН² 21, указанных в статье автора [3], по формулам (1 - 13, 14, 15) с учётом значения λ , 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 ЛМА^{№21} и МАН^{№2} для частоты 29550 Гц можно с помощью программы "MathCAD MathSoft, Inc." [5] рассчитать значение J_m и амплитудные значения $E_{\varphi m}$, $H_{\rho m}$, $H_{\theta m}$.

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

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

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

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

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

е) Ёмкость C резонансного конденсатора контура антенного тока $I_{am} = 0.62 \text{ А}$ (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 напряжение U_{am} на обмотке соленоида ЛМАН^{№21} в момент резонанса:

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

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

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

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

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

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

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

$$|E_{\varphi m}| = 1.76 \text{ мкВ/м} \quad (3 - 17).$$

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

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

Естественно, что при $\theta = 0$

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

Так как $H_{\text{МАН}^{\text{№2эфф}}} = 2.164 \text{ м}$, то $U_{1\text{МАН}^{\text{№2 вых}}} = H_{\text{МАН}^{\text{№2эфф}}} |E_{\varphi m}| = 38 \text{ мкВ}$ (3 - 19)

и $U_{2\text{МАН}^{\text{№2 вых}}} = |H_{\theta m}| W_{\text{МАН}^{\text{№2эфф}}} = 6.839 \text{ мВ}$ (3 - 20)

4. Заключение

1. Видим, что при $\rho = 17.5 \text{ м}$ и $\lambda = 82.27 \text{ м}$ 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 потока, 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.**