

О сдвоенной модели передающей линейной магнитной антенны электромагнитных волн для морских испытаний на частоте менее 1 кГц (часть 2)

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

1. В качестве напоминания на **Фото.1** представлен вид удвоенной модели Передающей Линейной Магнитной Антенны (**ПЛМА**) в момент её стендовых испытаний. Она состоит из модели ЛМАН[№] 37 (снизу) и модели ЛМАН[№] 37м (сверху) в герметичных оболочках, размещённых параллельно друг над другом на расстоянии между их продольными осями .



Фото.1.

1.1 Некоторые основные характеристики моделей ЛМАН[№] 37 и ЛМАН[№] 37м.

Измеренные с помощью на частоте , представленного на **Фото.2** в момент измерения в отсутствии магнитопровода параметров соленоида «возбуждения» продольного магнитного потока для одной из моделей ЛМА, приведены ниже:



Фото.2.

а) индуктивность L , сопротивление потерь r_s и добротность соленоида Q продольного магнитного поля «возбуждения» без магнитопровода имеют следующие значения:

для модели M_1 — L_1 , r_{s1} , Q_1 , а для M_2 — L_2 , r_{s2} , Q_2 .

б) индуктивность L , сопротивление потерь r_s и добротность Q соленоида продольного магнитного поля «возбуждения» в присутствии магнитопровода:

для модели M_1 — L_1 , r_{s1} , Q_1 , и для M_2 — L_2 , r_{s2} , Q_2 .

1.2. Величина эквивалентной резонансной емкости C_{res} в резонансной антенной цепи тока «возбуждения» блоков конденсаторов, представленных на **Фото.1**, измеренная на частоте **1 КГц**, равна C_{res} .

1.3. Производилась оценка коэффициента взаимной индукции k индуктивностей обмоток тока «возбуждения» между этими двумя моделями ПЛМА путём обработки результатов анализа **АЧХ Изо.1, Изо 2,Изо.3, Изо.4**. Величину k считаем положительной, если эквивалентная величина индуктивности L_{ant} антенного контура тока «возбуждения» удвоенной модели ПЛМА обладает большей величиной при том же значении контурной емкости C_{res} при осуществлённом варианте последовательного соединения концов обмоток соленоидов «возбуждения». Положение пика огибающих кривых «синего» и «зелёного» цвета на **Изо.1** и **Изо.2** находится в более высокой области по оси частот, чем положение пика огибающих кривых «синего» и «зелёного» цвета на **Изо.3** и **Изо.4**. Данный факт является свидетельством меньшей величины индуктивности антенного контура тока «возбуждения» удвоенной модели ПЛМА при осуществлённом и используемом в дальнейшем варианте подсоединения концов обмоток соленоидов модели M_1 и модели M_2 . Четыре цвета кривых используются при отображении результатов измерения с помощью виртуального цифрового четырёхканального осциллографа — спектра анализатора **АКИП-4110/1**, при этом — **Вход № 1** (канал А), — **Вход № 2** (канал Б), »- **Вход № 3** (канал В) и — **Вход № 4** (канал Г). В процессе мониторинга режима работы **УМ** и **удвоенной модели ПЛМА** на **Вход № 1** было подано падение напряжения на калибровочном сопротивлении R_{cal} .

. На **Вход№ 2** было подано напряжение **Urtout** с выхода

. На **Вход № 3**

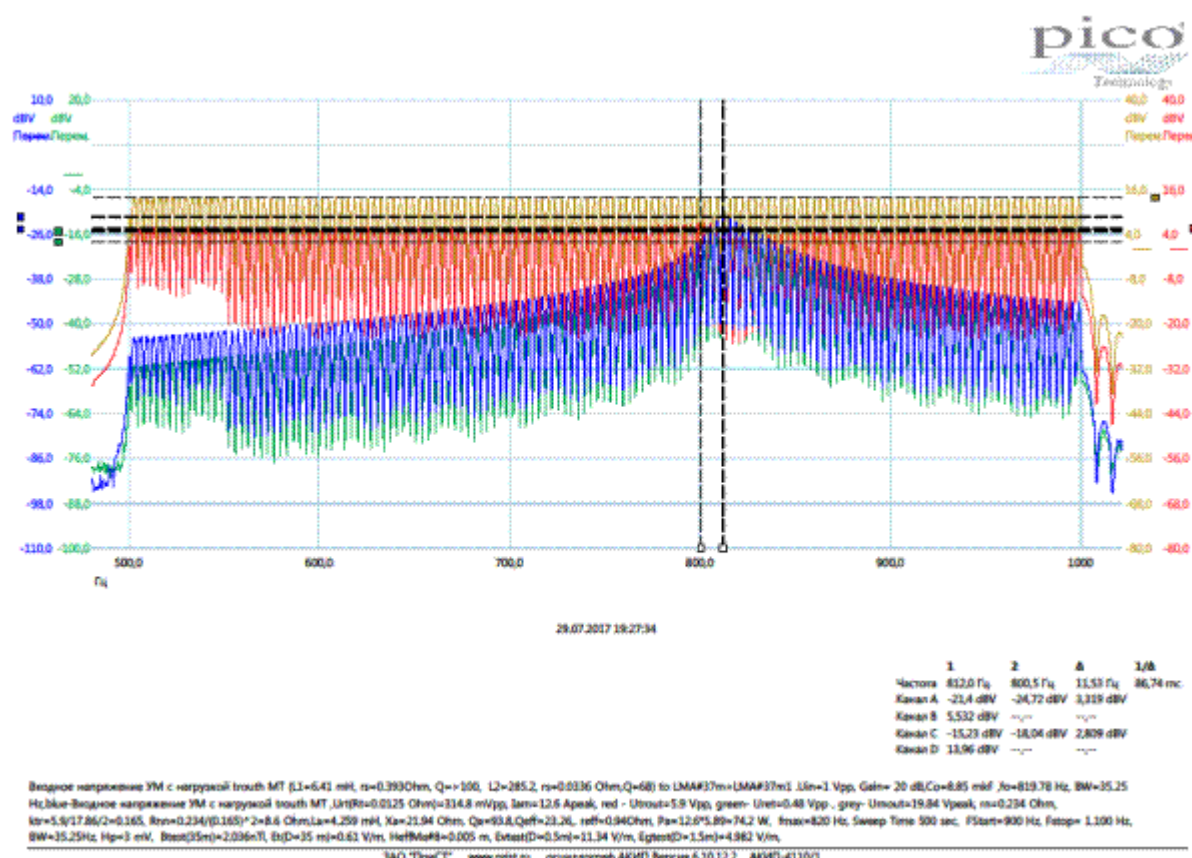
обхватившей торцовую часть внешних оболочек удвоенной модели ПЛМА, представленной на **Фото.1**). На **Вход № 4** было подано напряжение с

Итак, величина эквивалентной индуктивности может быть оценена с помощью вычислений по формуле: $L_{\Sigma} = L_{12} + L_{21} + 2K_{св}M_{12}$ (1.3 — 1), $M_{12} = \sqrt{L_{1x}L_{2x}}$ (1.3 — 2), где — эквивалентная величина индуктивности обмотки соленоида «возбуждения» модели ЛМАН[№] 37м, — эквивалентная величина индуктивности обмотки соленоида «возбуждения» модели ЛМАН[№] 37.

а) Для удвоенной модели ПЛМА существуют два способа последовательного подсоединения концов обмоток их соленоидов «возбуждения». Для АЧХ **Изо.3**. резонансное значение частоты несущей . поэтому с учётом значения (1.3 — 3 С учётом п.1.16 для модели и (1.3 — 4), поэтому (1.3 — 5) для расстояния между их осями.

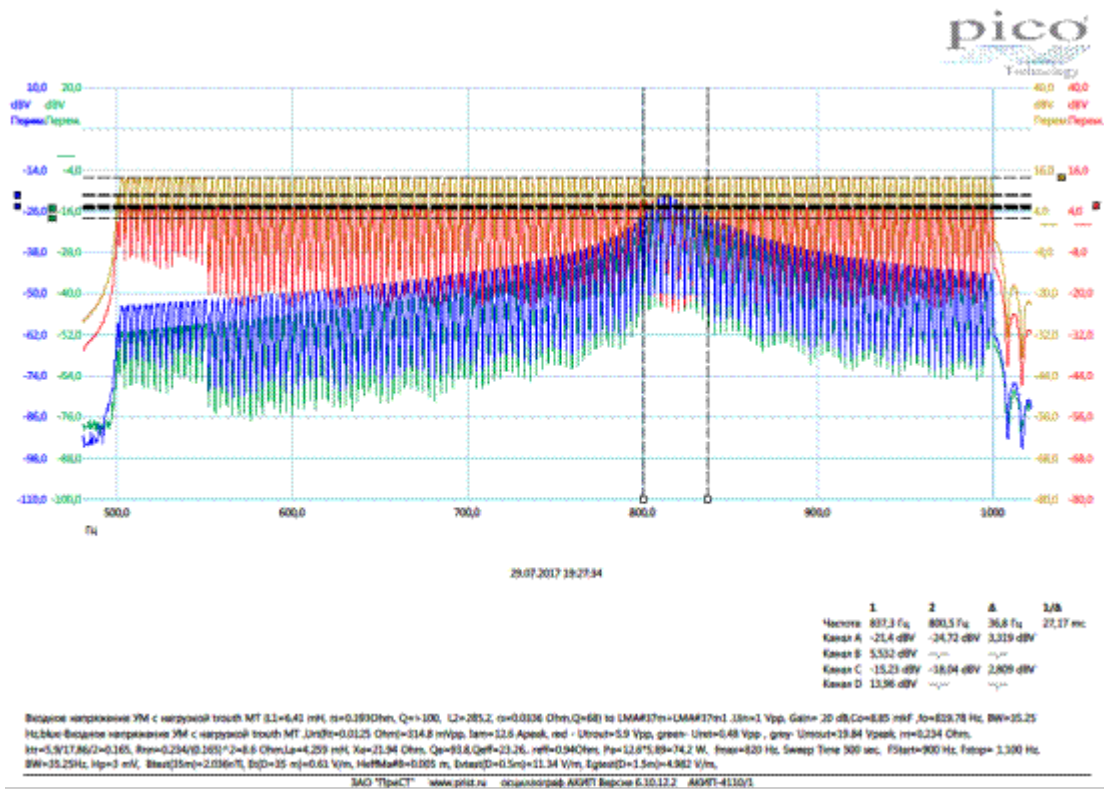
б) Тогда как для АЧХ **Изо.1** резонансное значение частоты несущей . поэтому с учётом значения (1.3 — 3 С учётом п.1.16 для модели и (1.3 — 4), поэтому - 0.06 (1.3 — 6) для расстояния между их осями.

Именно по этой причине в дальнейшем был выбран именно данный способ последовательного соединения концов обмоток «возбуждения» моделей ПЛМА.



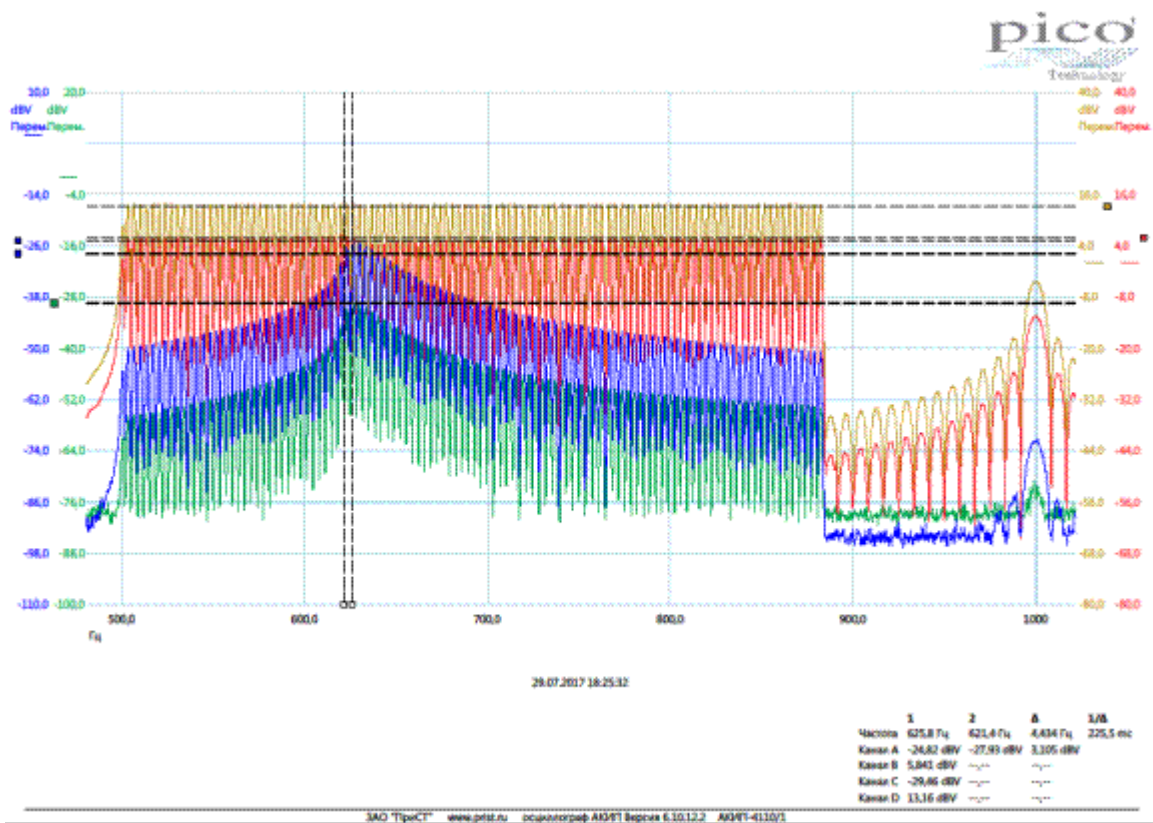
Изо.1

и

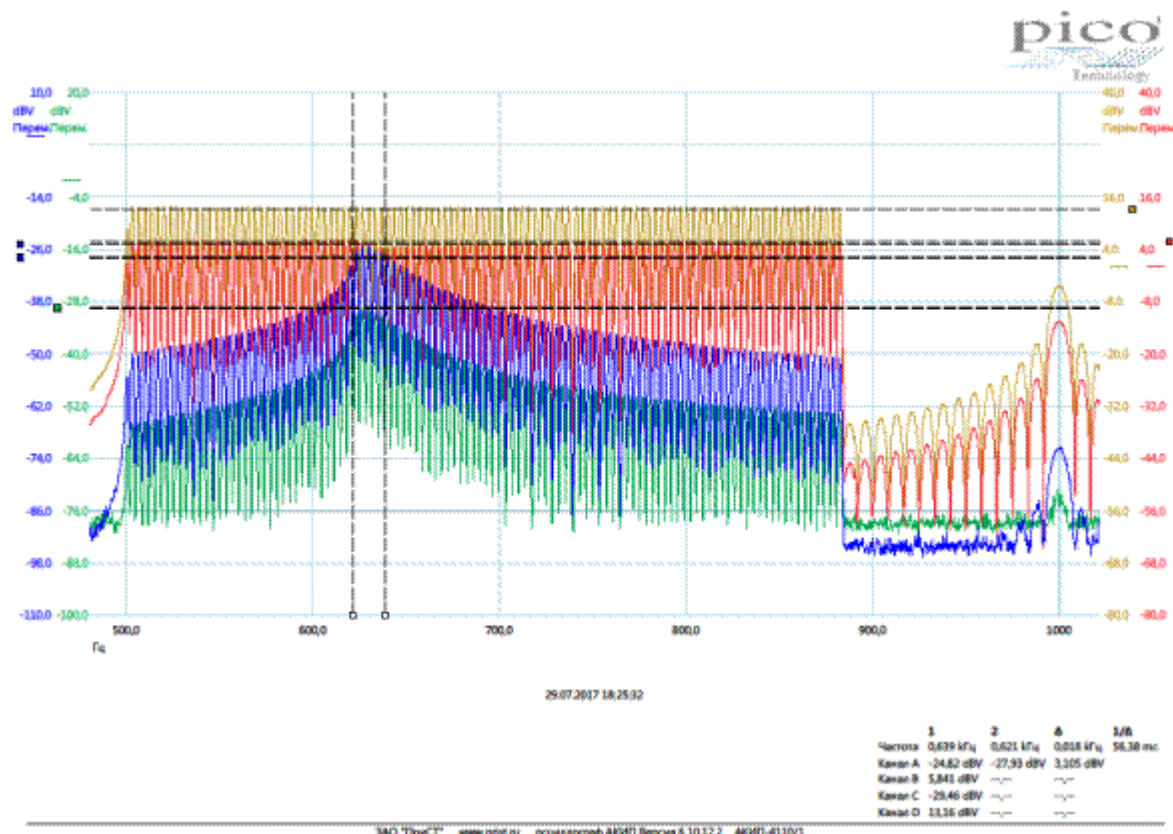


Изо.2.

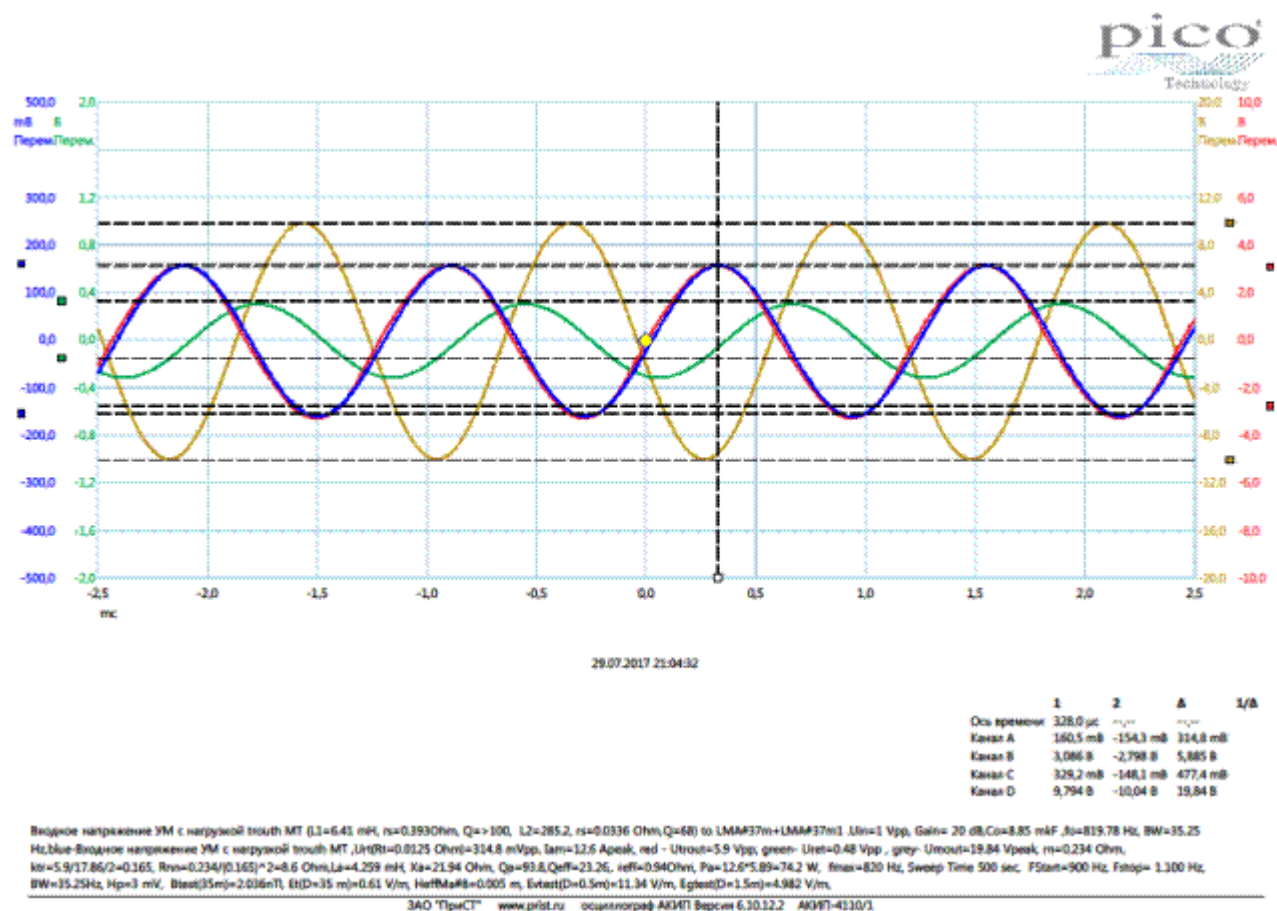
И



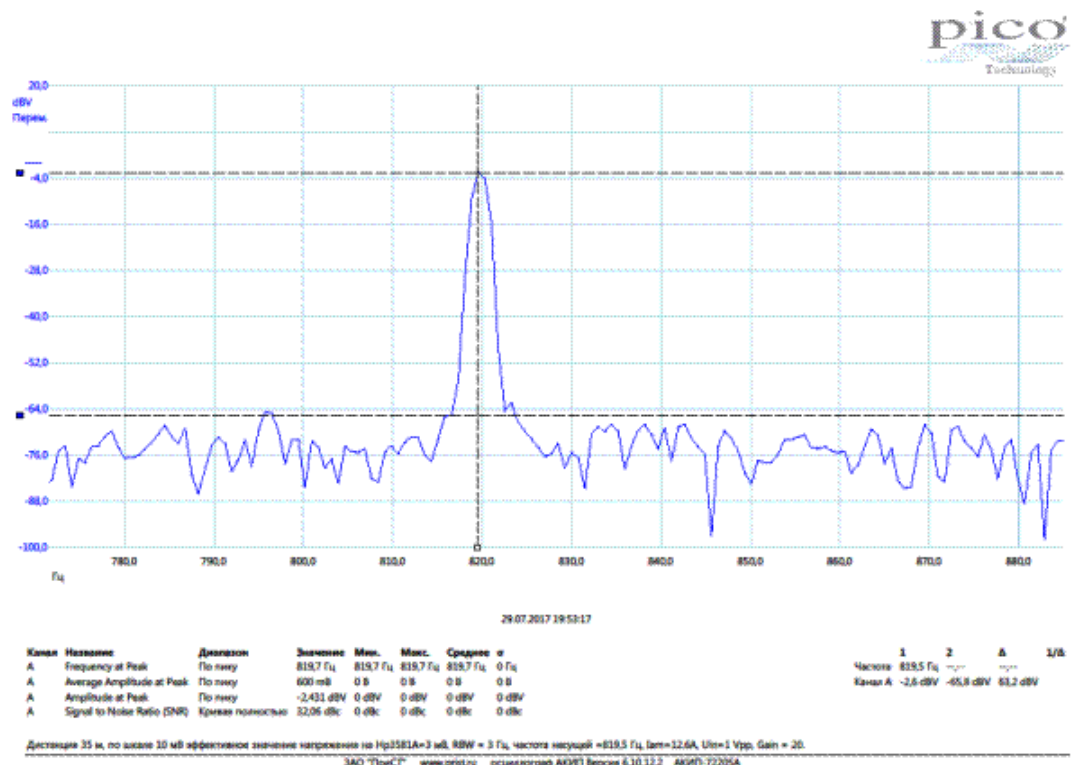
Изо.3.



Изо.4.



Изо.5



Изо.6

3.1. Данные, представленные на **Изо.1, Изо.2, Изо.3, Изо.4, Изо.5 и Изо.6** получены при значении положения много позиционного переключателя **УМ** в положении **КУ**, В этом случае в момент резонанса, когда протекаемый ток «возбуждения» по обмоткам соленоидов моделей ЛМАН[№] 37 и ЛМАН[№] 37м достигал амплитудного значения. Для случая Изо. 5 в силу нелинейности материала её магнитопроводов приходится путём плавного изменения сдвига фазы у сигналов, отображённых на **ВХ Изо.5** цветом (это напряжение и цветом (это напряжение за счёт плавного изменения частоты на выходе **ФГ** «ручкой» потенциометра плавной установки частоты, размещённой в правой верхней части передней панели **ФГ**, осуществлять совмещение пиков этих «кривых».

. При этом частота несущей. С помощью изображения АЧХ стало возможным определить на уровне -3 дБ значение полосы пропускания антенного контура тока «возбуждения» и прочие важные параметры, указанные в тексте в нижней части **Изо.6**. В процессе наблюдения за формой контролируемых напряжений, представленных на **Изо.6** осуществлялся мониторинг величины зарегистрированного сигнала (см. **Изо.5**) разработанной и собственноручно изготовленной автором модели

внешний вид которой в герметичной цилиндрической оболочке (5 см- диаметр, 100 см — длина) серого цвета представлен на **Фото.3**. Экранированный двух жильный кабель выходного сигнала модели **MAN[№] 8** (см. **Фото.3**). длиной порядка 95 см был подсоединен к входу прецизионного анализатора **HP 3581A "Wave Analyzer"**(см. **Фото.4**). Модель **MAN[№] 8** была находилась

в помещении размещения контролирующего оборудования режимом работы УМ и тестируемой удвоенной модели ПЛМА и комплекта устройств контроля выходного сигнала с MAN[№] 8 , изображенного на **Фото.4** в момент осуществления полевых измерений радиационного уровня на пересечённой местности, излучаемого в режиме **CW** удвоенной моделью ПЛМА. **HP 3581A "Wave Analyzer"**(см. **Фото.4**) — в процессе данного стендового теста удвоенной модели ПЛМА используется как прецизионный

селективный вольтметр с возможностью отсчёта зарегистрированного уровня сигнала с MAN[№] 8 не посредственно с помощью его электродинамического стрелочного прибора, как по шкале «линейного отсчёта», так и по шкале «логарифмического отсчёта» при установке полосы пропускания

RBW = 3 Гц. Значение частоты исследуемого сигнала возможно отсчитать по много разрядному цифровому индикатору. **HP 3581A «Wave Analyzer»**- обладает

в широком спектре его устанавливаемых предварительно с помощью двух много позиционных переключателей на его передней панели . Этот тракт аналогового усиления обладает , сохраняя

не изменой его спектральную «сигнал — шум» форму при выбранном заранее значении RBW с помощью размещённого на его передней панели много позиционного переключателя. Выходной сигнал этого тракта усиления может быть снят, подсоединением размещённого на его задней панели типа BNC разъема с помощью подсоединённого к нему коаксиального кабеля идущему к устройствам дальнейшего спектрального анализа, как это видно из содержания изображения **Фото.4**.

Итак, как отмечено в тексте, размещённом в нижней части изображения **ВХ Изо.6** :

а) был зарегистрировано с помощью **HP 3581A «Wave Analyzer»** при **RBW = 3 Гц** выходного сигнала **MAN[№] 8** на дистанции от излучаемой ЭМВ на частоте модели **ПЛМА** равный , при этом о виде его спектра можно судить по изображению спектральной плотности на **Изо.6. б)** с помощью портативного спектрометрического цифрового измерителя магнитной или электрической составляющей напряжённости электромагнитного поля типа **АКИП 4210/3 (см. Фото.,** установленный на штативе). С его помощью было зарегистрировано эффективное значение индукции магнитного поля в лаборатории при дистанции 35 м , что позволяет оценить

так называемую «Эффективную или действующую высоту» H_{eff} приёмной антенны MAN[№] 8 в месте её расположения. Итак,
$$E_{rest} = (B_{test} \cdot d_0) / \mu_0$$
 где



Фото.3



Фото.4.

3.2. Автор прежде, чем начать проектировать модель MAN^{№ 8}, так же как модели ЛMAN^{№ 37} перед тем как их изготавливать, теоретически рассчитывал возможное значение «Действующей или Эффективной Высоты» по предполагаем её геометрических и пр. параметрам, а также осуществлял все необходимые математические расчёты для их виртуальных моделей, даже с учётом размещения как модели приёмной антенны MAN^{№ 8} так и виртуальной модели исходя из предположения, что амплитудным значением

втор произвёл все необходимые теоретические расчёты на ПК с помощью лицензируемой компьютерной программы [13], приобретенной им еще в конце 90-стых годов. Копия (выполнена в pdf формате файла) результата такого расчёта для иллюстрации включена в виде рабочего материала в Приложении 1.

3.2.1 Существует формула для расчёта «Действующей Высоты» Приёмных Рамочных Антенн, в модернизированном виде которую с целью расчёта № 8 можно представить в виде:

$$H_{eff, M \neq 8} = 2\pi\mu_{eff}NA_{eff} / \lambda$$

(3.2.1 — 1), где N — число витков её обмотки

соленоида, каркас которого надет на стержень магнитопровода, $A_{эфф}$ — площадь поперечного сечения этого каркаса с намоткой в кв.м, λ — длина волны принимаемого сигнала в данной среде, $\mu_{эфф}$ — эффективное значение относительной величины магнитной проницаемости материала используемого стержня магнитопровода (естественно, имеется в виду его разомкнутость для силовых магнитных линий), где единицы измерения

№ 8, так же как и является

$$\lambda \text{ является м. При значениях } A_{эфф} = \pi d_c^2 / 4 \quad (3.2.1 — 2),$$

, так как в «свободном» пространстве для частоты

(3.2.1 — 3), то поэтому

№ 8 = , что практически совпало с её величиной, определённой в результате проводимых тестов, у казанной выше в (3.2 — 5).

В морской среде, когда величина объёмного сопротивления морской воды при , относительная величина магнитной проницаемости равна , а относительная величина диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = 81$, то оказывается что в такой среде величина длины волны при частоте несущей, равной [14.], может быть рассчитана по формуле:

$$\lambda = 2 \sqrt{\frac{\pi \Omega}{f \mu}}$$

(3.2.1 — 4), где $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м,

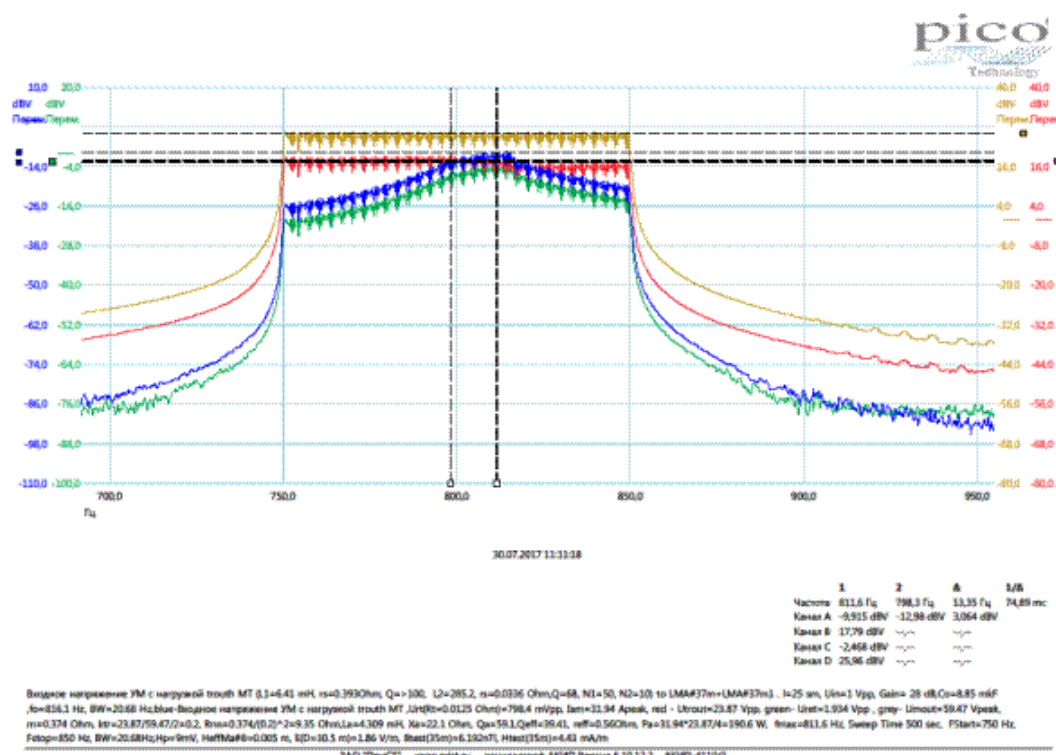
$$\lambda = 2 \sqrt{\frac{0.3\pi}{820 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}}$$

(3.2.1 — 5)

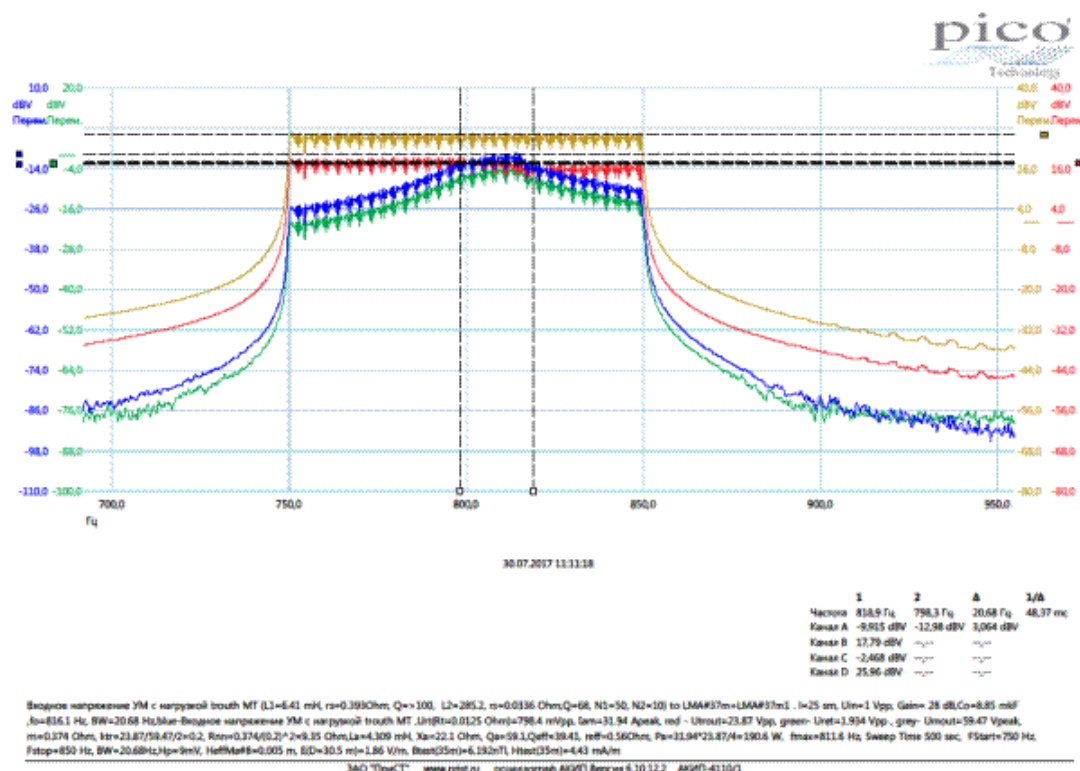
вместо

связи с таким практически обоснованном фактом

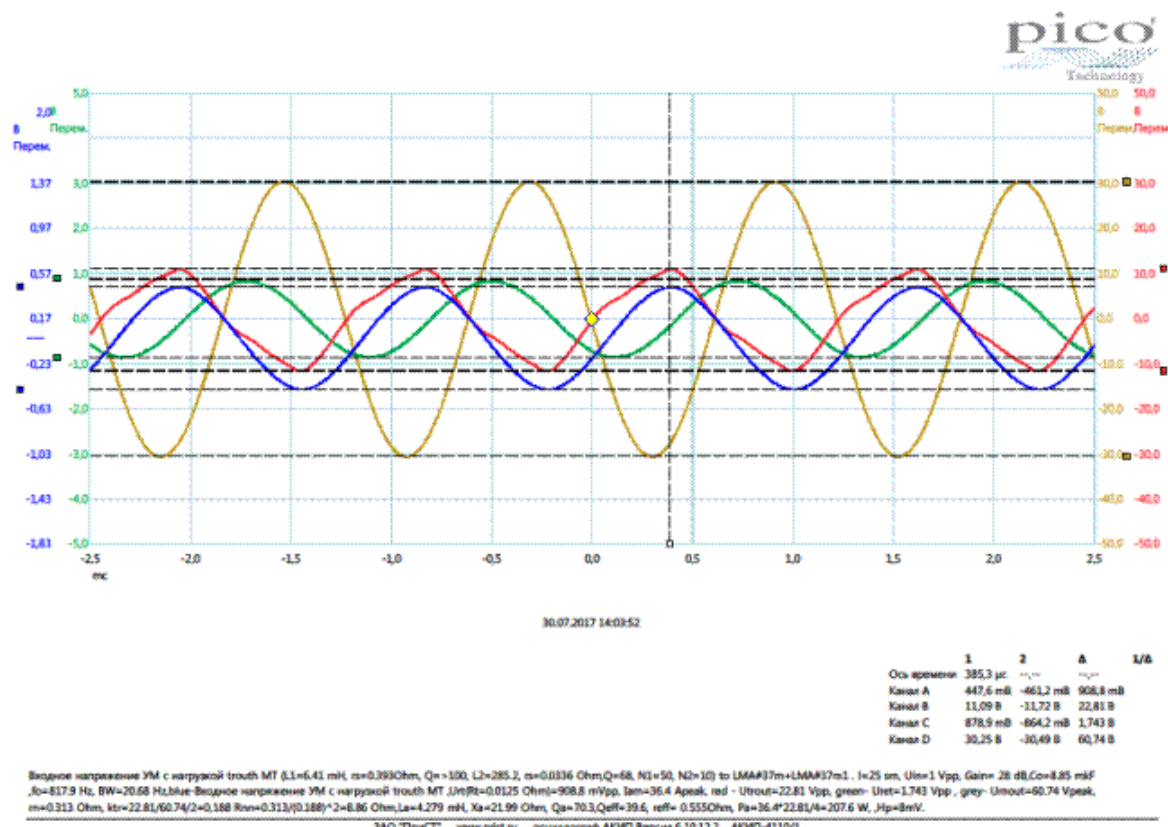
$$\text{№ 8} = \quad (3.2.1 — 6)$$



Изо.7



Изо.8



Изо.9.

3.2.2. Данные, представленные на **Изо.7**, **Изо.8**, получены при значении положения много позиционного переключателя **УМ КУ** , В этом случае в момент резонанса, когда протекаемый ток «возбуждения» по обмоткам соленоидов **моделей ЛМАН[№] 37 и ЛМАН[№] 37м** обладает амплитудным значением _____ и подводимая мощность _____ а на **Изо.9** — _____ и подводимая к испытываемой модели ПЛМА мощность _____. Как и ранее в силу нелинейности материала её магнитопроводов путём плавного изменения фазы

частоты ручкой её изменения на передней панели **ФГ** осуществлялось совмещение пика кривой «синего» цвета, представленной на **Изо.9** (

с пиком кривой «красного» цвета (

). При этом частота несущей

. С помощью изображения АЧХ стало возможным определить на уровне -3 дБ значение полосы пропускания антенного контура тока «возбуждения» и прочие важные параметры, указанные в тексте в нижней части **Изо.9**.

4. Интересно ответить, что в соответствии с расчётами **Приложения 1** в уровень выходного сигнала виртуальной приёмной антенны **MAN⁸** для дистанции при составляет величину **26 мВ**, тогда как в лабораторных условиях (см. текст в нижней части при составило амплитудного значения. При этом на дистанции **35 м** амплитудное значение выходного сигнала виртуальной модели **MAN⁸** составляет величину Это объясняется увеличенным значения её «Действующей высоты»

в

до значения

мкВ.

Необходимо отметить, что вычислениях, приведённых в **Приложении 1**, автор воспользовался ни только выше приведённой формуле **(3.2 — 4)** для вычисления длины волны в средах обладающих конечной величиной, принятого у, но вместо принятого ими выражения для расчёта экспоненциального затухания электрической или магнитной составляющей напряжённости электромагнитного поля частоты f в таких средах:

$$k''[m^{-1}] = \frac{\pi f \mu}{\Omega} \quad (4 — 1)$$

автор предпочёл использовать выражение:

$$k''[m] = \sqrt{\frac{10^{-7} \Omega \sigma \mu^2 v}{\lambda [\Gamma]}}$$

(4 — 2) для расчёта слоя именно морской среды с параметрами

. Данное выражение любезно предоставлено автору по его электронной почте более 2х лет назад

, получивший данный результат исследованием при значении её параметров. Данное выражение автор использовал впервые при написании работы **[4]**. В настоящий момент всмотревшись внимательно в суть содержания выражения с учётом сохранения размерностей внутри его для использования в компьютерной программы **[13]** **Приложения 1** автор пришёл к заключения, что

$$k''[m] = \sqrt{\frac{4 \pi \Omega}{\lambda f}}$$

фактически имеет вид

10^{-7} Гн/м. — это слой , но

Отсюда можно сделать далеко идущий для
практического применения вывод: , f

5. Заключение

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.
- 9.
- 10.
- 11.

12.

13.

14.

Приложение 1:

1.

$$\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ henry (1-1)} \quad d_0 = 0.115 \text{ m} \quad N = 57 \quad l_0 = 0.91 \text{ m} \quad f_1 = 817 \text{ Hz} \quad f_2 = 1000 \text{ Hz}$$

$$L_0 = (\pi \cdot d_0 \cdot N)^2 \cdot 10^{-9} \frac{(10)^4 \cdot \text{henry}}{[(l_0 + 0.45 \cdot d_0) \cdot 10^2] \cdot \text{m}} \quad (1-2) \quad L_0 = 4.409 \cdot 10^{-5} \text{ henry (1-3)}$$

$$\mu_{\text{eff}} = 52 \quad L_{\text{a}} := L_0 \cdot \mu_{\text{eff}} \quad (1-4) \quad L_{\text{a}} = 2.293 \cdot 10^{-3} \text{ henry (1-5)} \quad l_{\text{a}1} := 1.8 \text{ m}$$

$$\sqrt{-1} \quad l_{\text{a}1} := 1.8 \text{ m} \quad D = 35 \text{ m} \quad f_1 = 817 \text{ Hz} \quad \epsilon_0 = 8.854187817 \cdot 10^{-12} \frac{\text{farad}}{\text{m}}$$

$$\pi = 3.142 \quad e = 2.718 \quad e^i = 0.54 + 0.841i \quad e^{-i} = 0.54 - 0.841i$$

$$\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{henry}}{\text{m}} \quad \mu_r = 1 \quad \epsilon = 0 \quad \epsilon_r = 1 \quad \epsilon_0 = 8.854187817 \cdot 10^{-12} \frac{\text{farad}}{\text{m}}$$

$$\mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{henry}}{\text{m}} \quad \epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{farad}}{\text{m}} \quad \mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{henry}$$

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad \omega := \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} \quad \omega = 2.998 \cdot 10^8 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad \epsilon_r = 81$$

$$l_{\text{a}1} := 1.8 \text{ m}$$

$$\omega = 2.998 \cdot 10^8 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad \lambda_{01} := \frac{\omega}{f_1} \quad \lambda_{01} = 3.669 \cdot 10^5 \cdot \text{m} \quad \omega_0 := 2 \cdot \frac{\pi}{\lambda_{01}}$$

$$\omega_0 = 1.712 \cdot 10^{-5} \cdot \text{m}^{-1} \quad \psi_{01} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\pi}{\lambda_{01}} \quad \psi_{01} = 5.993 \cdot 10^{-4}$$

$$W_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad W_0 = 376.73 \cdot \text{ohm} \quad W_r = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \cdot W_0 \quad W_r = 41.859 \cdot \text{ohm}$$

$$\rho = 0.3 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m} \quad \lambda_{g1} := 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot \frac{\rho}{\mu_0 \cdot f_1}} \quad \lambda_{g1} = 60.597 \cdot \text{m} \quad h_m := \sqrt{10^7 \cdot \frac{\text{m} \cdot \rho}{\text{henry} \cdot f_1}}$$

$$k_1 := \sqrt{\frac{\pi \cdot f_1 \cdot \mu_0}{\rho}} \quad k_1 = 0.104 \cdot \text{m}^{-1} \quad m_1 := e^{-k_1 \cdot D} \quad h_m = 60.597 \cdot \text{m}$$

$$mR_0 = R_m \cdot \frac{h_m}{(4 \cdot \pi)} \cdot (D^{-2} + i \cdot \lambda^{-1} \cdot D^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \epsilon \cdot D} \cdot \cos(\theta)$$

$$mR_0 = 2m \cdot h_m \cdot \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot W_0} \cdot (-i \cdot D^{-3} + \lambda^{-1} \cdot D^{-2} + \lambda^{-2} \cdot D^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \epsilon \cdot D} \cdot \cos(\theta)$$

$$mR_p = 2m \cdot h_m \cdot \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot W_0} \cdot (-i \cdot D^{-3} + \lambda^{-2} \cdot D^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \epsilon \cdot D} \cdot \sin(\theta) \quad h_m = 35.7 \cdot \text{A}$$

$$Q_{a1} = 59.1 \quad BW1 := \frac{f_1}{Q_{a1}} \quad BW1 = 13.824 \cdot \text{Hz} \quad m_1 := 2 \cdot \pi \cdot f_1 \quad m_1 = 5.133 \cdot 10^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$X_{a1} = i \cdot L_{\text{a}} \cdot m_1 \quad X_{a1} = 11.77i \cdot \text{ohm} \quad U_{m1} := h_m \cdot X_{a1} \quad U_{m1} = 420.21 \cdot \text{V}$$

$$\begin{aligned}
\text{Cos} &:= \frac{-1}{\lambda a1 \cdot i} & \text{Cos} &= 1.689 \cdot 10^{-5} \cdot i \text{ rad} & m &:= \frac{|\lambda a1|}{Qa1} & m &= 0.199 \cdot \text{ohm} \\
mH_p &= \text{Im} \cdot \frac{\text{Im}}{(4 \cdot \pi)} \cdot (D^{-2} + i \cdot \lambda^{-1} \cdot D^1) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot D} \cdot \cos(\theta) & \text{Pa1} &:= m \cdot \frac{\text{Im}^2}{2} & \text{Pa1} &= 126.913 \cdot \text{W} \\
mH_q &= \text{Im} \cdot \text{Im} \cdot \frac{\lambda}{8 \cdot \pi \cdot W_0} \cdot (-i \cdot D^3 + \lambda^{-1} \cdot D^2 + \lambda^{-2} \cdot D^1) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot D} \cdot \cos(\theta) \\
mH_p &= \text{Im} \cdot \text{Im} \cdot \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot W_0} \cdot (-i \cdot D^3 + \lambda^{-2} \cdot D^1) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot D} \cdot \sin(\theta) & \theta &:= 0 & I &:= 1 \\
\text{Ra1} &:= \frac{Ua1 \cdot m1}{\pi \cdot d_0 \cdot N} & \text{Ra1} &= 29.403 i \cdot \frac{\text{V}}{\text{m}} & d_0 &= 8.115 \cdot \text{m} \\
\left[\frac{\text{Im}}{4 \cdot \pi} \cdot (d_0^{-2} + i \cdot \lambda a1^{-1} \cdot d_0^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot d_0} \cdot \cos(\theta) \right] & & \text{Im1} &:= 1.8 \cdot \text{m} \\
\text{Ja1} &:= \frac{\text{Ra1}}{\left[I \cdot \frac{\text{Im1}}{(4 \cdot \pi)} \cdot (d_0^{-2} + i \cdot \lambda a1^{-1} \cdot d_0^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot d_0} \cdot \cos(\theta) \right]} & \text{Ja1} &= -3.119 \cdot 10^{-6} + 1.884 i \cdot \text{V} \\
|\text{Ja1}| &= 1.884 \cdot \text{V} & \text{Im} &= 35.7 \cdot \text{A} & v1 &:= \frac{|\text{Ja1}|}{\text{Im}} & v1 &= 0.053 \cdot \text{ohm} \\
D &= 35 \cdot \text{m} & \theta &= 0 & m &= 1.712 \cdot 10^{-5} \cdot \text{m}^{-1} & \text{Im1} &= 1.8 \cdot \text{m} \\
e^{-i \cdot \omega \cdot D} &= 1 - 5.993 \cdot 10^{-4} i & \cos(\theta) &= 1 \\
mB\phi1 &:= \text{Ja1} \cdot \frac{\text{Im1}}{(4 \cdot \pi)} \cdot (D^{-2} + i \cdot \lambda a1^{-1} \cdot D^1) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot D} \cdot \cos(\theta) & mB\phi1 &= 1.106 \cdot 10^{-7} + 2.203 \cdot 10^{-4} i \cdot \frac{\text{V}}{\text{m}} \\
|mB\phi1| &= 2.203 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{V}}{\text{m}} & \text{HeffMAN} &:= 2 \cdot \pi \cdot 3200 \cdot \frac{108 \cdot 9.16 \cdot 10^{-4} \cdot \text{m}^2}{\lambda a1} \\
\text{HeffMAN} &= 5.421 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m} & \lambda a1 &= 3.669 \cdot 10^5 \cdot \text{m} & \text{UMASout} &:= \text{HeffMAN} \cdot |mB\phi1| \\
\text{UMASout} &= 1.194 \cdot 10^{-6} \cdot \text{V} & \text{Im} &:= \text{Ja1} & D &= 35 \cdot \text{m} \\
mH\theta1 &= \left(\text{Ja1} \cdot \text{Im1} \cdot \frac{\lambda a1}{4 \cdot \pi \cdot W_0} \right) \cdot [-i \cdot D^3 + \lambda a1^{-1} \cdot D^2 + (\lambda a1)^{-2} \cdot D^1] \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot D} \cdot \cos(\theta) \\
mH\theta1 &= 6.13 \cdot 10^{-3} - 3.079 \cdot 10^{-6} i \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{A} & |mH\theta1| &= 6.13 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{A} \\
U12\text{out}\theta\text{SE} &:= W_0 \cdot \text{HeffMAN} \cdot |mH\theta1| & U12\text{out}\theta\text{SE} &= 0.013 \cdot \text{V}
\end{aligned}$$

$$mH\phi_1 := J_0 l \cdot km_1 \cdot \frac{\lambda_0 l}{4 \cdot \pi \cdot W_0} \cdot (-1 \cdot D^{-3} + \lambda_0 l^{-2} \cdot D^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \pi \cdot n} \cdot \sin(\theta)$$

$$mH\phi_1 = 0 \cdot m^{-1} \cdot A \quad U_{EoutMAS} := \sqrt{(U_{MAout})^2 + (U_{I2outBS})^2}$$

$$U_{EoutMAS} = 0.013 \cdot V$$

$$1.2 \quad \nu = 81 \quad \rho = 0.3 \cdot \text{obm} \cdot \text{m} \quad W_0 = 41.859 \cdot \text{obm} \quad \lambda_{g1} = 66.597 \cdot \text{m}$$

$$mB\phi_{1r} := J_0 l \cdot \frac{km_1}{(4 \cdot \pi)} \cdot (D^{-2} + 1 \cdot \lambda_{g1} l^{-1} \cdot D^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{\lambda_{g1}}} \cdot \cos(\theta) \quad D = 35 \cdot \text{m}$$

$$mB\phi_{1r} = 9.227 \cdot 10^{-6} - 2.543 \cdot 10^{-4} i \quad \left| \frac{V}{m} \right| mB\phi_{1r} = 2.544 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{V}{m}$$

$$mHB_{1r} := J_0 l \cdot km_1 \cdot \frac{\lambda_{g1}}{4 \cdot \pi \cdot W_0} \cdot (-1 \cdot D^{-3} + \lambda_{g1} l^{-1} \cdot D^{-2} + \lambda_{g1} l^{-2} \cdot D^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{\lambda_{g1}}} \cdot \cos(\theta)$$

$$mHB_{1r} = -1.194 \cdot 10^{-3} - 3.067 \cdot 10^{-6} i \quad m^{-1} \cdot A \quad |mHB_{1r}| = 1.233 \cdot 10^{-3} \cdot m^{-1} \cdot A$$

$$mH\phi_{1r} := J_0 l \cdot km_1 \cdot \frac{\lambda_{g1}}{4 \cdot \pi \cdot W_0} \cdot (-1 \cdot D^{-3} + \lambda_{g1} l^{-2} \cdot D^{-1}) \cdot e^{-i \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{\lambda_{g1}}} \cdot \sin(\theta) \quad |mH\phi_{1r}| = 0 \cdot m^{-1} \cdot A$$

$$H_{effMA} g := 2 \cdot \pi \cdot 3200 \cdot \frac{108 \cdot 9.16 \cdot 10^{-4} \cdot m^2}{\lambda_{g1}} \quad H_{effMA} g = 32.825 \cdot \text{m}$$

$$U_{Z1outMASg} := H_{effMA} g \cdot |mB\phi_{1r}| \quad U_{Z1outMASg} = 8.35 \cdot 10^{-3} \cdot V$$

$$U_{Z2outMASg} := H_{effMA} g \cdot W_0 \cdot |mHB_{1r}| \quad U_{Z2outMASg} = 0.017 \cdot V$$

$$U_{EoutMASg} := \sqrt{(U_{Z1outMASg})^2 + (U_{Z2outMASg})^2} \quad U_{EoutMASg} = 0.019 \cdot V$$

$$1.3 \quad \rho = 0.3 \cdot \text{obm} \cdot \text{m} \quad \lambda_{g1} = 66.597 \cdot \text{m} \quad D := 300 \cdot \text{m} \quad n_1 := e^{-\frac{D}{hm}}$$

$$\frac{-D}{hm} = -4.951 \quad n_1 = 7.078 \cdot 10^{-3}$$

$$mB\phi_{1g} := J_0 l \cdot \frac{km_1}{(4 \cdot \pi)} \cdot (D^{-2} + 1 \cdot \lambda_{g1} l^{-1} \cdot D^{-1}) \cdot n_1 \cdot e^{-i \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{\lambda_{g1}}} \cdot \cos(\theta)$$

$$mB\phi_{1g} = -1.065 \cdot 10^{-7} - 1.179 \cdot 10^{-8} i \quad \left| \frac{V}{m} \right| mB\phi_{1g} = 1.072 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{V}{m}$$

$$m_{HB1g} := J_{e1} \cdot \frac{\lambda_{g1}}{4 \cdot \pi \cdot W_r} \cdot (-1 \cdot D^3 + \lambda_{g1}^{-1} \cdot D^2 + \lambda_{g1}^{-2} \cdot D^1) \cdot n1 \cdot e^{-\frac{D \cdot 2 \cdot \pi}{\lambda_{g1}}} \cdot \cos(\theta)$$

$$m_{HB1g} = -0.211 \cdot 10^{-10} + 2.905 \cdot 10^{-9} \text{ l} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{A} \quad |m_{HB1g}| = 3.019 \cdot 10^{-9} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{A}$$

$$m_{Hp1g} := J_{e1} \cdot \frac{\lambda_{g1}}{4 \cdot \pi \cdot W_r} \cdot (-1 \cdot D^3 + \lambda_{g1}^{-2} \cdot D^1) \cdot n1 \cdot e^{-\frac{D \cdot 2 \cdot \pi}{\lambda_{g1}}} \cdot \sin(\theta) \quad |m_{Hp1g}| = 0 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{A}$$

$$H_{effMAAg} := 2 \cdot \pi \cdot 6200 \cdot \frac{108 \cdot 9.16 \cdot 10^{-4} \cdot \text{m}^2}{\lambda_{g1}} \quad H_{effMAAg} = 32.825 \cdot \text{m}$$

$$U_{21outMAAg} := H_{effMAAg} \cdot |m_{Bp1g}| \quad U_{21outMAAg} = 9.518 \cdot 10^{-6} \cdot \text{V}$$

$$U_{22outMAAg} := H_{effMAAg} \cdot W_r \cdot |m_{HB1g}| \quad U_{22outMAAg} = 4.148 \cdot 10^{-6} \cdot \text{V}$$

$$U_{EoutMAAg} := \sqrt{(U_{21outMAAg})^2 + (U_{22outMAAg})^2} \quad U_{EoutMAAg} = 5.499 \cdot 10^{-6} \cdot \text{V}$$

For LMA37andLMA37m

$$UMAs_{300m} := 2 \cdot U_{EoutMAAg} \quad UMAs_{300m} = 1.098 \cdot 10^{-5} \cdot \text{V} \quad ES00m := \frac{UMAs_{300m}}{H_{effMAAg}}$$

$$ES00m = 3.314 \cdot 10^{-7} \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

1.3 a

$$\rho = 0.3 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m} \quad \lambda_{g1} = 60.597 \cdot \text{m} \quad D := 400 \cdot \text{m} \quad n1 := e^{-\frac{D}{\lambda_{g1}}}$$

$$\frac{-D}{\ln n1} = -6.601 \quad n1 = 1.359 \cdot 10^{-3}$$

$$m_{Bp1g} := J_{e1} \cdot \frac{\lambda_{g1}}{4 \cdot \pi} \cdot (D^2 + 1 \cdot \lambda_{g1}^{-1} \cdot D^1) \cdot n1 \cdot e^{-\frac{D \cdot 2 \cdot \pi}{\lambda_{g1}}} \cdot \cos(\theta)$$

$$m_{Bp1g} = 1.082 \cdot 10^{-8} - 1.082 \cdot 10^{-8} \text{ l} \cdot \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad |m_{Bp1g}| = 1.53 \cdot 10^{-8} \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$m_{HB1g} := J_{e1} \cdot \frac{\lambda_{g1}}{4 \cdot \pi \cdot W_r} \cdot (-1 \cdot D^3 + \lambda_{g1}^{-1} \cdot D^2 + \lambda_{g1}^{-2} \cdot D^1) \cdot n1 \cdot e^{-\frac{D \cdot 2 \cdot \pi}{\lambda_{g1}}} \cdot \cos(\theta)$$

$$m_{HB1g} = -2.535 \cdot 10^{-10} - 3.902 \cdot 10^{-10} \text{ l} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{A} \quad |m_{HB1g}| = 4.163 \cdot 10^{-10} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{A}$$

$$mH\phi1g := Jn1 \cdot km1 \cdot \frac{\lambda g1}{4 \cdot \pi \cdot Wr} \cdot (-i \cdot D^3 + \lambda g1^{-2} \cdot D^1) \cdot n1 \cdot e^{-i \cdot \frac{D2 \cdot \pi}{\lambda g1}} \cdot \sin(\theta) \quad |mH\phi1r| = 0 \cdot m^{-1} \cdot A$$

$$mB\phi1g := Jn1 \cdot \frac{km1}{(4 \cdot \pi)} \cdot (D^2 + i \cdot \lambda g1^{-1} \cdot D^1) \cdot n1 \cdot e^{-i \cdot \frac{D2 \cdot \pi}{\lambda g1}} \cdot \cos(\theta)$$

$$HeffMAAg := 2 \cdot \pi \cdot 3200 \cdot \frac{108 \cdot 9.16 \cdot 10^{-4} \cdot m^2}{\lambda g1} \quad HeffMAAg = 32.825 \cdot m$$

$$mB\phi1g = 1.042 \cdot 10^{-8} - 1.042 \cdot 10^{-8} i \quad \frac{V}{m} \quad |mB\phi1g| = 1.53 \cdot 10^{-8} \quad \frac{V}{m}$$

$$U21outMAAg := HeffMAAg \cdot |mB\phi1g| \quad U21outMAAg = 3.518 \cdot 10^{-6} \quad eV$$

$$U22outMAAg := HeffMAAg \cdot Wr \cdot |mB\phi1g| \quad U22outMAAg = 5.72 \cdot 10^{-7} \quad eV$$

$$mB\phi1g := Jn1 \cdot km1 \cdot \frac{\lambda g1}{4 \cdot \pi \cdot Wr} \cdot (-i \cdot D^3 + \lambda g1^{-1} \cdot D^2 + \lambda g1^{-2} \cdot D^1) \cdot n1 \cdot e^{-i \cdot \frac{D2 \cdot \pi}{\lambda g1}} \cdot \cos(\theta)$$

$$U2outMAAg := \sqrt{(U21outMAAg)^2 + (U22outMAAg)^2} \quad U2outMAAg = 7.612 \cdot 10^{-7} \quad eV$$

$$mB\phi1g = -2.535 \cdot 10^{-10} - 3.302 \cdot 10^{-10} i \quad m^{-1} \cdot A \quad |mB\phi1g| = 4.163 \cdot 10^{-10} \quad m^{-1} \cdot A$$

$$mH\phi1g := Jn1 \cdot km1 \cdot \frac{\lambda g1}{4 \cdot \pi \cdot Wr} \cdot (-i \cdot D^3 + \lambda g1^{-2} \cdot D^1) \cdot n1 \cdot e^{-i \cdot \frac{D2 \cdot \pi}{\lambda g1}} \cdot \sin(\theta) \quad |mH\phi1r| = 0 \cdot m^{-1} \cdot A$$

$$HeffMAAg := 2 \cdot \pi \cdot 3200 \cdot \frac{108 \cdot 9.16 \cdot 10^{-4} \cdot m^2}{\lambda g1} \quad HeffMAAg = 32.825 \cdot m$$

$$U21outMAAg := HeffMAAg \cdot |mB\phi1g| \quad U21outMAAg = 5.023 \cdot 10^{-7} \quad eV$$

$$U22outMAAg := HeffMAAg \cdot Wr \cdot |mB\phi1g| \quad U22outMAAg = 5.72 \cdot 10^{-7} \quad eV$$

$$U2outMAAg := \sqrt{(U21outMAAg)^2 + (U22outMAAg)^2} \quad U2outMAAg = 7.612 \cdot 10^{-7} \quad eV$$

$$\text{For } LMA37 \text{ and } LMA37m \quad UMAA_400m := 2 \cdot U2outMAAg$$

$$UMA A_400m = 1.522 \cdot 10^{-6} \quad eV$$

$$E400m := \frac{UMAS_400m}{HeffMAAg} \quad E400m = 4.638 \cdot 10^{-8} \frac{V}{m}$$

$$1.26 \quad \rho = 0.3 \text{ ohm} \cdot m \quad \lambda g1 = 62.397 \cdot m \quad D := 500 \cdot m \quad n1 := \frac{-D}{\lambda g1}$$

$$\frac{-D}{\lambda g1} = -8.231 \quad n1 = 2.609 \cdot 10^{-4}$$

$$mB\phi1g := \text{Im}1 \cdot \frac{\text{Im}1}{(4 \cdot \pi)} \cdot (D^2 + i \cdot \lambda g1^{-1} \cdot D^1) \cdot n1 \cdot e^{-i \frac{Dg \pi}{\lambda g1}} \cdot \cos(\theta)$$

$$mB\phi1g = 3.001 \cdot 10^{-10} + 2.322 \cdot 10^{-9} i \quad \frac{V}{m} \quad |mB\phi1g| = 2.341 \cdot 10^{-9} \frac{V}{m}$$

$$mB\theta1g := \text{Im}1 \cdot \text{Im}1 \cdot \frac{\lambda g1}{4 \cdot \pi \cdot Wt} \cdot (-i \cdot D^3 + \lambda g1^{-1} \cdot D^2 + \lambda g1^{-2} \cdot D^1) \cdot n1 \cdot e^{-i \frac{Dg \pi}{\lambda g1}} \cdot \cos(\theta)$$

$$mB\theta1g = 6.224 \cdot 10^{-11} - 1.309 \cdot 10^{-12} i \quad m^{-1} \cdot A \quad |mB\theta1g| = 6.225 \cdot 10^{-11} m^{-1} \cdot A$$

$$mB\psi1g := \text{Im}1 \cdot \text{Im}1 \cdot \frac{\lambda g1}{4 \cdot \pi \cdot Wt} \cdot (-i \cdot D^3 + \lambda g1^{-2} \cdot D^1) \cdot n1 \cdot e^{-i \frac{Dg \pi}{\lambda g1}} \cdot \sin(\theta) \quad |mB\psi1g| = 0 \cdot m^{-1} \cdot A$$

$$HeffMAAg := 2 \cdot \pi \cdot 3200 \cdot \frac{100 \cdot 9.16 \cdot 10^{-4} \cdot m^2}{\lambda g1} \quad HeffMAAg = 32.825 \cdot m$$

$$UZ1outMAAg := HeffMAAg \cdot |mB\phi1g| \quad UZ1outMAAg = 7.684 \cdot 10^{-8} \cdot V$$

$$UZ2outMAAg := HeffMAAg \cdot Wt \cdot |mB\theta1g| \quad UZ2outMAAg = 8.554 \cdot 10^{-8} \cdot V$$

$$UZoutMAAg := \sqrt{(UZ1outMAAg)^2 + (UZ2outMAAg)^2} \quad UZoutMAAg = 1.15 \cdot 10^{-7} \cdot V$$

For LMA37andLMA37m

$$UMAS_900m := 2 \cdot UZoutMAAg \quad UMAS_900m = 2.3 \cdot 10^{-7} \cdot V \quad E900m := \frac{UMAS_900m}{HeffMAAg}$$

$$E900m = 7.006 \cdot 10^{-9} \frac{V}{m}$$