

Ф. Б. ГРИНЕВИЧ, К. Б. КАРАНДЕЕВ, Г. А. ШТАМБЕРГЕР

(Новосибирск)

**О ПРИНЦИПАХ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ
МЕТОДОМ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Рассмотрены принципы построения аппаратуры для электроразведки, основанные на измерении корреляционных связей между сигналами естественных электромагнитных полей, имеющих случайный характер.

За рубежом уже несколько лет применяется самолетный и наземный варианты метода естественных электромагнитных полей звуковых и инфразвуковых частот [1, 2]. Как известно [3], основным источником естественных электромагнитных полей звукового диапазона являются тропические грозы. Очевидно, что использование такого мощного естественного источника излучения электромагнитной энергии вместо искусственных маломощных генераторов сулит большие выгоды: повышается глубинность исследования и значительно уменьшается вес и мощность геофизической аппаратуры.

Сообщения зарубежных авторов о методе естественных электромагнитных полей не раскрывают существа способов построения аппаратуры, а освещают только вопросы эффективности и практической целесообразности его использования.

Метод естественных электромагнитных полей может применяться как в наземном, так и в аэроварианте. Он может оказаться одним из самых эффективных методов аэроэлектроразведки.

В период годового максимума гроз на земле (с апреля по сентябрь) каждую секунду происходит около сотни грозовых разрядов. Так как каждый разряд — это сложный электромагнитный процесс, то электромагнитное поле мировых гроз в период максимума представляет собою случайный процесс с почти сплошным спектром частот («белый» шум). При движении вдоль однородной поверхности вертикальная составляющая магнитного поля затухает значительно быстрее горизонтальной. В результате этого на значительном удалении от района гроз (тысячи километров) вдоль земной поверхности движется практически плоская волна, имеющая только горизонтальную магнитную составляющую. Если на пути такой волны встречается неоднородность электрической проводимости залегающих под земной поверхностью пород (электрическая аномалия), то за счет отражения волны возникает вертикальная составляющая магнитного поля. Следовательно, по вертикальной составляющей поля естественных электромагнитных полей можно су-

дять об электрической аномалии пород и обнаружить перспективные площади для разведки полезных ископаемых.

В зарубежной литературе описана, по существу, одна весьма упрощенная блок-схема аппаратуры [1] (рис. 1). Описанная блок-схема не только не раскрывает существа вопроса, но может привести к неправильному толкованию принципов создания аппаратуры для метода естественных электромагнитных полей.

В ИАЭ СО АН СССР были исследованы различные принципы построения аппаратуры для метода естественных электромагнитных полей. Рассмотрим один из предложенных авторами [4]. При разработке аппаратуры для метода естественных электромагнитных полей необходимо учитывать следующее.

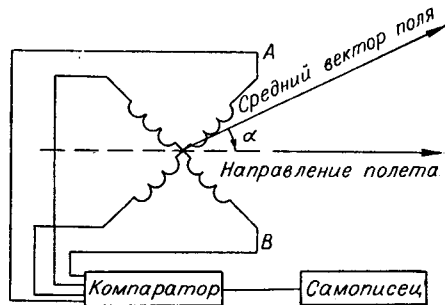


Рис. 1.

1. Естественные электромагнитные поля представляют собою случайный непрерывный процесс, аналогичный «белому» (тепловому) шуму, который подчиняется теореме Найквиста:

$$\overline{e^2} = 4kTR\Delta f, \quad (1)$$

где $\overline{e^2}$ — среднее значение квадрата э. д. с. шума;
 k — постоянная Больцмана;
 T — абсолютная температура;
 R — эквивалентное шумовое сопротивление;
 Δf — диапазон выделяемых из спектра частот.

Как видно из (1), если $\Delta f \rightarrow 0$, то $\overline{e^2} \rightarrow 0$. Следовательно, выделение сигнала естественных электромагнитных полей на фоне других случайных помех (шумов ламп и т. п.) нельзя произвести путем применения избирательных усилителей, узкополосных фильтров и т. п. Выделение полезного сигнала и борьба с помехами может быть осуществлена только корреляционными методами.

2. Вспышки молний распределены случайно не только во времени, но и в пространстве. В связи с этим нельзя принять в качестве геометрического образа первичного и отраженного магнитного поля эллипса поляризации. Поэтому нельзя строить аппаратуру на измерении каких-либо параметров эллипса поляризации (малой и большой осей, угла наклона осей и др.). Необходимо при построении аппаратуры учитывать статистический характер молниевых вспышек и регистрацию отраженной электромагнитной волны вести корреляционными приемниками.

3. При геофизических исследованиях по методу естественных электромагнитных полей используются электромагнитные колебания звуковых и инфразвуковых частот (до 500—1000 гц). На этих частотах реактивные эквивалентные электрические параметры залегающих пород значительно меньше активных. Поэтому магнитная составляющая отраженной волны будет примерно совпадать (будет ковариантной) с производной от магнитной составляющей падающей электромагнитной волны. Так как можно предположить, что вертикальная составляющая магнитного поля волны возникает только вследствие отражения от залегающих пород, то, следовательно, она ковариантна производной от горизонтальной составляющей магнитного поля.

4. Для определенного типа случайных непрерывных процессов, к которым относятся и естественные электромагнитные поля, справедливо следующее положение: корреляция между случайным процессом и его производной по времени равна нулю, т. е.

$$r = \frac{\overline{U U'}}{\sqrt{\overline{U^2} (\overline{U'})^2}} = 0, \quad (2)$$

где r — коэффициент корреляции;
 U, U' — функция, описывающая случайный процесс, и ее производная ($U' = \frac{dU}{dt}$).

5. Коэффициент корреляции между производными по времени двух случайных процессов равен единице, если первообразные функции полностью коррелированы, т. е. если

$$|r| = \frac{\overline{U_1 U_2}}{\sqrt{\overline{U_1^2} \overline{U_2^2}}} = 1, \quad (3)$$

то

$$|r'| = \frac{\overline{U_1' U_2'}}{\sqrt{(\overline{U_1'})^2 (\overline{U_2'})^2}} = 1,$$

где U_1 и U_2 — полностью коррелированные случайные функции;
 U_1' и U_2' — их производные по времени;
 r' — коэффициент корреляции производных.

На рис. 2 представлено схематически расположение двух взаимно-перпендикулярных приемников (антенн) Π_1 и Π_2 составляющих переменного магнитного поля. Для упрощения выкладок предположим, что горизонтальная составляющая магнитного поля H_r обусловлена только первичным полем дальних грозовых разрядов, а вертикальная составляющая H_b — только отражением от залегающих пород повышенной проводимости. Предположим также, что приемники Π_1 и Π_2 чувствительны непосредственно к магнитному полю (такой чувствительностью обладают, например, магнито-модуляционные датчики). Как видно из рис. 2, сигналы U_1 и U_2 , наводимые в приемниках Π_1 и Π_2 соответственно, будут равны:

$$\begin{aligned} U_1 &= S_1 (H_r \sin \alpha + H_b \cos \alpha); \\ U_2 &= S_2 (H_r \cos \alpha - H_b \sin \alpha), \end{aligned} \quad (4)$$

где S_1, S_2 — чувствительности приемников к магнитному полю;
 α — угол наклона приемника Π_2 к горизонту.

В соответствии с п. 3 вертикальная составляющая H_b примерно ковариантна производной от горизонтальной составляющей по времени. Следовательно, можно записать, что

$$H_b \cong \rho \frac{dH_r}{dt} = \rho H_r', \quad (5)$$

где ρ — параметр, зависящий от электрических свойств, размеров и расположения отражающего тела.

Подставляя (5) в (4), получим:

$$\begin{aligned} U_1 &= S_1 (H_r \sin \alpha + \rho H_r' \cos \alpha); \\ U_2 &= S_2 (H_r \cos \alpha - \rho H_r' \sin \alpha). \end{aligned} \quad (6)$$

Как указывалось в п. 1, выделение сигнала при использовании метода естественных электромагнитных полей не может быть осуществлено посредством избирательного усиления, поэтому необходимо применять корреляционные методы выделения сигналов.

Для устранения шумов усилителей можно использовать схему, представленную на рис. 3. Сигналы U_1 и U_2 с приемников Π_1 и Π_2 подаются

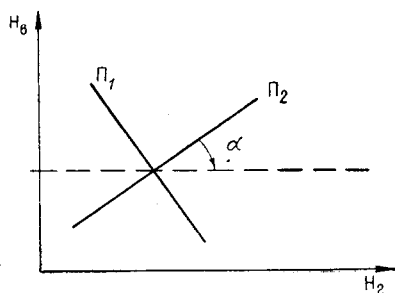


Рис. 2.

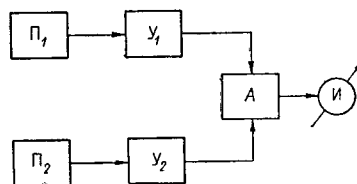


Рис. 3.

на усилители $У_1$ и $У_2$, шумовые напряжения которых (приведенные ко входу) равны $U_{1ш}$ и $U_{2ш}$. С усилителей сигналы поступают на коррелятор А. В простейшем случае это может быть умножающая схема, выходной сигнал которой пропорционален ненормированному коэффициенту корреляции. Выходные сигналы усилителей равны:

$$\begin{aligned} U_{1в} &= (U_1 + U_{1ш}) k_1; \\ U_{2в} &= (U_2 + U_{2ш}) k_2, \end{aligned} \quad (7)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты усиления.

Среднее значение выходного сигнала с умножающей схемы соответствует

$$\bar{U} = \overline{U_{1в} U_{2в}} = a k_1 k_2 \overline{(U_1 + U_{1ш})(U_2 + U_{2ш})}, \quad (8)$$

где a — коэффициент передачи умножающей схемы. Подставляя (6) в (8) и учитывая, что корреляция между сигналами $U_{1ш}$ и $U_{2ш}$, U_1 и $U_{2ш}$, U_2 и $U_{1ш}$ и между H_r и H_r' отсутствует, после преобразований получим

$$\bar{U} = a k_1 k_2 S_1 S_2 [\overline{H_r^2} + (\overline{\rho H_r'})^2] \frac{\sin 2\alpha}{2}. \quad (9)$$

При отсутствии аномалии электрической проводимости залегающих пород коэффициент ρ равен нулю. Следовательно, по второму члену выражения (9) можно судить об аномалиях проводимости. Измеритель И (см. рис. 3) должен выделять сигнал, пропорциональный ρ .

Как видно из (9), сигнал U будет максимальным при $\alpha=45^\circ$, т. е. приемные элементы для получения максимальной чувствительности должны устанавливаться под углом 45° и 135° к горизонту. Заметим, что при этом величина чувствительности будет мало зависеть от неточности соблюдения условия $\alpha=45^\circ$.

В зарубежных работах [1], как указывалось, описан аэровариант метода естественных электромагнитных полей, при котором приемные рамки в буксируемой гондole помещаются под углом 45° и 135° к горизонту. Причина выбора таких углов и принцип работы измерительной аппаратуры не раскрыт. Можно с большой степенью достоверности предположить, что способ построения аппаратуры аналогичен описанному выше.

Рассмотренный способ выделения полезного сигнала при использовании метода естественных электромагнитных полей имеет два существенных недостатка*. Во-первых, первичное поле H_r по величине значительно (в несколько десятков и сотен раз) больше отраженного сигнала ρH_r . Поэтому измерение и регистрация сигнала $(\rho H_r)^2$ с большой точностью представляется весьма трудным или даже в некоторых случаях невозможным делом. Действительно, согласно выражению (9), необходимо измерить небольшой сигнал $(\rho H_r)^2$ на фоне большого сигнала H_r^2 .

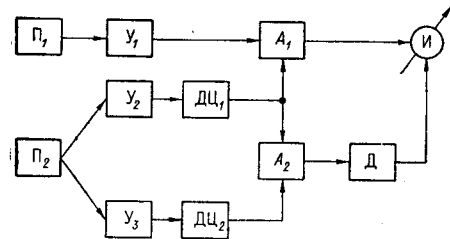


Рис. 4.

Во-вторых, при осуществлении аппаратуры по описанному выше методу практически очень трудно бороться с помехами, возникающими от вибрации приемных элементов в постоянном магнитном поле земли. Источник вибрации обоих приемных элементов один и тот же (например, самолет). Следовательно, вибрационные помехи будут коррелированы, пройдут через коррелятор и создадут паразитный сигнал даже при отсутствии электрических аномалий. Уменьшения вибрационных помех можно добиться хорошей амортизацией и «разнесением» механических характеристик подвески приемных элементов (приемные элементы должны быть подвешены отдельно, на амортизирующих устройствах с различными характеристиками и т. п.). Однако, как показывает предварительный расчет, получить надлежащий эффект этими методами технически очень трудно.

На рис. 4 представлена блок-схема аппаратуры для метода естественных электромагнитных полей, свободная от отмеченных недостатков. Выходные сигналы U_1 и U_2 с приемных элементов Π_1 и Π_2 подаются на три усилителя U_1 , U_2 и U_3 . На выходе усилителей U_2 и U_3 стоят дифференцирующие цепочки $ДЦ_1$ и $ДЦ_2$. С выхода усилителя U_1 и цепочек $ДЦ_1$ и $ДЦ_2$ сигналы поступают на две умножающие (корреляционные) схемы A_1 и A_2 . На выходе схемы A_2 включен делитель $Д$. При помощи делителя $Д$ и нулевого индикатора $И$ можно установить отношение величин выходных сигналов A_1 и A_2 (делитель можно градуировать в величинах этого отношения).

* Из выражения (9) можно также усмотреть еще один недостаток: зависимость выходного сигнала от абсолютных значений поля. Однако он не имеет принципиального характера.

Рассмотрим принцип работы этой схемы. Аналогично выражению (7) можно записать, что выходные сигналы усилителей U_1 , U_2 и U_3 равны:

$$\begin{aligned} U_{1в} &= (U_1 + U_{1ш} + U_{1в.п}) k_1; \\ U_{2в} &= (U_2 + U_{2ш} + U_{2в.п}) k_2; \\ U_{3в} &= (U_2 + U_{3ш} + U_{2в.п}) k_3, \end{aligned} \quad (10)$$

где U_1 , U_2 — полезные сигналы от естественных электромагнитных полей;

$U_{1ш}$, $U_{2ш}$, $U_{3ш}$ — шумы усилителей;

$U_{1в.п}$, $U_{2в.п}$ — наведенные сигналы от вибрационных помех;

k_1 , k_2 , k_3 — коэффициенты усиления.

Выходные сигналы дифференцирующих цепочек ДЦ₁ и ДЦ₂ будут равны:

$$\begin{aligned} U_{1ц} &= \frac{dU_{2в}}{dt} = U'_{2в} = (U'_2 + U'_{2ш} + U'_{2в.п}) k_2; \\ U_{2ц} &= \frac{dU_{3в}}{dt} = U'_{3в} = (U'_2 + U'_{3ш} + U'_{2в.п}) k_3. \end{aligned} \quad (11)$$

На корреляционную схему A_1 поступают сигналы $U_{1в}$ и $U_{1ц}$. Следовательно, выходной сигнал $\bar{U}_{1а}$ схемы A_1 будет определяться

$$\bar{U}_{1а} = a_1 \bar{U}_{1в} \bar{U}_{1ц} = a_1 k_1 k_2 \overline{(U_1 + U_{1ш} + U_{1в.п}) (U'_2 + U'_{2ш} + U'_{2в.п})}, \quad (12)$$

где a_1 — коэффициент передачи схемы A_1 .

После перемножения в выражении (12) будет 9 членов. Очевидно, что средние значения произведений $\overline{U'_2 U_{1ш}}$, $\overline{U'_2 U_{1в.п}}$, $\overline{U'_{2ш} U_{1ш}}$, $\overline{U'_{2ш} U_{1в.п}}$, $\overline{U'_{2в.п} U_1}$, $\overline{U'_{2в.п} U_{1ш}}$ равны нулю, так как взаимная корреляция сомножителей этих произведений равна нулю.

Вибрационные помехи могут возникнуть от одного и того же источника (шум самолета, вибрации гондолы в потоке воздуха и др.). Поэтому сигналы от вибрационных помех $U_{1в.п}$ и $U_{2в.п}$ могут быть коррелированы, и произведение $\overline{U_{1в.п} U_{2в.п}}$ не будет равно нулю. Однако вибрационные помехи относятся к тому типу случайных процессов, для которых корреляция между производной от функции и функцией равна нулю, т. е. $\overline{U_{в.п} U'_{в.п}} = 0$. Следовательно, среднее значение произведения $\overline{U'_{2в.п} U_{1в.п}}$ также может быть принято равным нулю*. Таким образом, из (12) получаем

$$\bar{U}_{1а} = a_1 k_1 k_2 \overline{U_1 U_2}. \quad (13)$$

Подставляя (6) в (13), имеем

$$\bar{U}_{1а} = a_1 k_1 k_2 S_1 S_2 \overline{(H \sin \alpha + \rho H'_r \cos \alpha) (H'_r \cos \alpha - \rho H''_r \sin \alpha)}.$$

* Может оказаться, что для некоторых составляющих вибрационных помех $\overline{U_{в.п} U'_{в.п}} \neq 0$. Тогда защита от помех будет сводиться к подавлению вибраций такого вида, что существенно легче осуществить, чем подавление всех вибраций.

Так как для естественных электромагнитных полей

$$\overline{H_r H_r'} = 0, \quad \overline{H_r H_r''} = 0, \quad \overline{H_r H_r'''} = 0,$$

то последнее равенство приводится к виду:

$$\overline{U_{1a}} = a_1 k_1 k_2 S_1 S_2 \rho \overline{(H_r')^2} \cos^2 \alpha. \quad (14)$$

На выходе корреляционной схемы A_2 сигнал будет равен

$$\overline{U_{2a}} = a_2 \overline{U_{1a} U_{2a}},$$

где a_2 — коэффициент передачи схемы A_2 .

Подставляя (11) в последнее равенство и учитывая, что взаимная корреляция между сигналами U_2 , $U_{2ш}$, $U_{2в.п}$ и $U_{2ш}'$ отсутствует, получаем

$$\overline{U_{2a}} = a_2 k_2 k_3 [\overline{(U_2')^2} + \overline{(U_{2в.п}')^2}].$$

Подставляя значение U_2' из (6), имеем

$$\overline{U_{2a}} = a_2 k_2 k_3 [S_2^2 \overline{(H_r')^2} \cos^2 \alpha + \rho^2 S_2^2 \overline{(H_r'')^2} \sin^2 \alpha + \overline{(U_{2в.п}')^2}]. \quad (15)$$

Если коэффициент деления η делителя D выбрать таким, что индикатор I будет показывать нуль, т. е. уравновешивать схему посредством регулировки делителя, то

$$\begin{aligned} \overline{U_{1a}} - \eta \overline{U_{2a}} &= 0; \\ \eta &= \frac{\overline{U_{1a}}}{\overline{U_{2a}}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляя (14) и (15) в (16), находим

$$\eta = \frac{a_1 k_1 S_1 S_2 \rho \overline{(H_r')^2} \cos^2 \alpha}{a_2 k_3 [S_2^2 \overline{(H_r')^2} \cos^2 \alpha + \rho^2 S_2^2 \overline{(H_r'')^2} \sin^2 \alpha + \overline{(U_{2в.п}')^2}]}. \quad (17)$$

Как следует из (17), оптимальным значением угла α будет $\alpha=0$. При этом

$$\eta = \frac{a_1 k_1 S_1 S_2 \rho \overline{(H_r')^2}}{a_2 k_3 [S_2^2 \overline{(H_r')^2} + \overline{(U_{2в.п}')^2}]}. \quad (18)$$

Таким образом, приемный элемент Π_1 следует расположить вертикально, а Π_2 — горизонтально. Нетрудно убедиться (17), что небольшие отклонения приемных элементов от этого положения (при сохранении взаимной перпендикулярности) не вызывают существенных изменений показаний прибора. Если учесть, что горизонтальная составляющая поля во много раз больше вертикальной, то при отсутствии вибрационных

помех отклонение приемных элементов на $\pm 10^\circ$ вызывает изменение показаний прибора меньше чем на 1%, что является практически вполне приемлемым. Весьма существенным является также и то, что отклонение приемных элементов от нормального положения вызывает только изменение чувствительности, но не вызывает появления паразитного сигнала при отсутствии отражающих объектов.

Из (18) следует, что, в отличие от предыдущей схемы, наличие вибрационных помех только изменяет чувствительность прибора в целом и не вызывает появления паразитного сигнала при отсутствии электрических аномалий, так как при $\rho=0$ (нет отражения от залегающих пород повышенной проводимости) коэффициент r равен нулю. Заметим еще одно положительное свойство последней схемы. Как следует из теоретических расчетов (см. также [5]), горизонтальная составляющая естественного электромагнитного поля в общем случае в десятки раз больше вертикальной. При данной схеме построения аппаратуры вибрационные помехи складываются только с сигналом от горизонтальной составляющей. Следовательно, в этом случае вибрационная защита облегчается в десятки раз по сравнению с другими схемами.

Для принципиально полного устранения влияния вибрационных помех на результат измерения необходимо приемный элемент Π_2 механически разделить на две части — Π_2 и Π_2' , подключив каждую из них ко входам усилителей $У_2$ и $У_3$. Конструкция приемных элементов должна быть такой, чтобы вибрационная скорость первого элемента была пропорциональной вибрационному смещению второго или наоборот.

Если предположить, что вибрационные помехи в горизонтальном приемнике каким-либо путем сведены к пренебрежимо малой величине (например, при наземном варианте это легко осуществить), то выражение (18) приводится к виду:

$$\eta = \frac{a_1 k_1 S_1}{a_2 k_3 S_2} \rho. \quad (19)$$

Из (19) следует, что показания прибора, собранного по данной блок-схеме, будут определяться только коэффициентом отражения ρ , т. е. свойствами залегающих пород, и не будут зависеть ни от величины естественных электромагнитных полей, ни от спектра их частот.

Мы рассмотрели основы построения аппаратуры для геофизической разведки методом естественных электромагнитных полей в предположении, что приемные элементы чувствительны непосредственно к величине магнитной составляющей поля. Нетрудно показать, что все вышеизложенное справедливо и для аппаратуры с любыми другими приемниками магнитного поля (например, с приемными рамками). Таким образом, полученные результаты являются общими.

В заключение следует также отметить, что предлагаемый принцип построения аппаратуры будет весьма эффективен при создании аэро-электроразведочных устройств для метода индукции, так как в этом случае принципиально отпадает необходимость в строгой фиксации положения гондолы относительно самолета.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. H. Ward. AFMAG — Airborne and Ground.— *Geophysic's*, 1959, v. XXIV, № 4.
2. S. H. Ward, W. O. Cartier, G. H. Mc Haughlin, W. A. Robinson. Prospecting by use of natural alternating magnetic fields of audio and subaudio frequencies.— *The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, 1958, v. 51, № 556.

3. Н. Г. Клейменова. Современные представления о природе высокочастотных вариаций электромагнитного поля Земли (1 гц—1 кц).— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, № 12.
4. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневич, Г. А. Штамбергер. Способ геополяризации естественного переменного магнитного поля.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1960, № 12.
5. Ю. Б. Шауб. Об интерпретации результатов измерений угла наклона плоскости электрической разведки. Авторское свидетельство по заявке № 885009/26-25, 1964.

*Поступила в редакцию
25 февраля 1965 г.,
после переработки —
30 апреля 1965 г.*
