

У. С. ВАЛЕЕВ

(Новосибирск)

ИЗМЕРЕНИЕ В ВОЗДУХЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ИНФРАЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ СИНХРОННЫМ ЕМКОСТНЫМ НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДОВ

Показано, что обнаружение слабых электромагнитных полей инфразвуковых частот от некоторых источников при соблюдении определенных условий измерения целесообразнее производить не по магнитной, а по электрической компоненте. Рассмотрен процесс синхронного накопления зарядов на емкости и установлено, что при этом методе обеспечиваются условия, необходимые для эффективного измерения по электрической компоненте.

Измерение в воздухе электромагнитных полей инфразвуковых частот (порядка 20 гц и ниже) представляет большие трудности ввиду общей тенденции к понижению чувствительности индукционных датчиков поля с уменьшением частоты и наличия больших промышленных и естественных полей Земли, представляющих помеху при измерении электромагнитного поля какого-либо источника. Если на время отвлечься от наличия помех, то возможности измерения электромагнитных полей будут определяться, как известно, порогом чувствительности измерительной аппаратуры, т. е. собственными шумами аппаратуры. С помощью современной аппаратуры по магнитной компоненте возможно измерение полей до 10^{-6} — 10^{-7} а/м [1, 2], а по электрической компоненте — разности потенциалов порядка $U = El = 10^{-3}$ — 10^{-4} в в двух точках, отстоящих на расстоянии l . На практике чаще всего измерение производится по магнитной компоненте. Но, исходя из этих предельных измеримых значений полей, нетрудно показать, что, за исключением случая, когда источником является магнитный диполь, расположенный на близком расстоянии, измерение поля по электрической компоненте обеспечивает регистрацию более слабых полей.

Для источников, имеющих характер электрического диполя, это утверждение не нуждается в специальном доказательстве. Для плоского электромагнитного поля оно следует из известного соотношения между электрической и магнитной компонентами в волне

$$E [в/м] = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} H = 120 \pi H [а/м].$$

Например, для двух точек, отстоящих на расстоянии $l = 100$ м, предельное значение напряженности электрического поля равно $E_{пр} =$

$= \frac{U}{l} = 10^{-6} \text{ в/м}$, что соответствует $H = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ а/м}$. Это значение магнитной компоненты почти на два порядка ниже порога чувствительности методов измерения по магнитной компоненте. Однако при использовании электрометрических. возникает, таким образом, необходимость в согласовании полных сопротивлений и выделении сигнала из помех еще до его усиления. Этими трудностями, возникающими при измерении поля по электрической компоненте, объясняется в основном применение методов измерения поля в этом диапазоне частот только по магнитной компоненте.

Ниже показывается, что синхронное с сигналом накопление на емкости зарядов от электрического диполя и измерение накопленных зарядов обеспечивают согласование полных сопротивлений и выделение сигнала из помех.

Рассмотрим процесс накопления зарядов на емкости. Электрический диполь (датчик) представляет собой источник э. д. с. с чисто емкостным внутренним сопротивлением (C_B на рис. 1). Датчик подключается к накопительной емкости C_C определенным образом (см. рис. 1, 2). Функцию переключения датчика обозначим $y(\omega_0 t)$, а э. д. с., наведенную на диполе, $U = E(\omega t)l$. Цепь накопления, включающая в себя и соединительные кабели и вход электрометрического усилителя, будем считать состоящей из последовательно соединенных сопротивления R и емкости C_C . Индуктивные сопротивления цепей в рассматриваемом диапазоне частот, а также омические сопротивления и взаимные емкости отдельных участков проводников, образующих диполь, малы по сравнению с R и C_B , C_C соответственно, и в расчетах ими можно пренебречь.

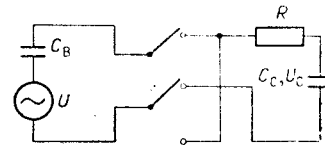


Рис. 1.

Процесс переключения можно осуществить с помощью четырех сопротивлений, включенных в плечи моста, диагоналями которого являются датчик и накопительная емкость C_C с сопротивлением R (рис. 3), причем $R_1 = R_3 = R_0 (y \omega_0 t)$; $R_2 = R_4 = R_0 y \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right)$; $R_0 C_B \gg 1$. На основании шести линейных уравнений для токов в контурах и точках ветвления этого моста получаем для накопленного на C_C заряда q одно линейное неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами. Решение этого уравнения в общем виде встречает серьезные математические трудности. Для упрощения задачи рассматриваем процесс накопления заряда на C_C в два этапа: сначала

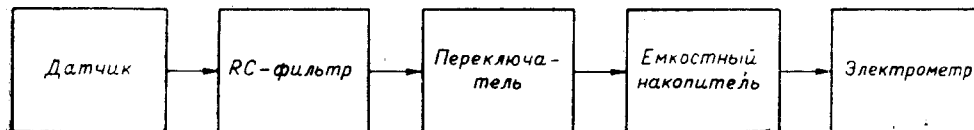


Рис. 2.

находим рекуррентное соотношение для заряда за одно подключение, а затем за все N подключений.

Пусть функция переключения $y(\omega_0 t)$ имеет вид (рис. 4)

$$y(\omega_0 t) = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1,3,5\dots} \frac{1}{i} \cos i \omega_0 \tau \sin i \omega_0 t; \quad (1)$$

$$\omega_0 = \frac{\pi}{\tau + \Delta t}.$$

Так как $C_B = \text{const}$, а за время одного подключения функция $y(\omega_0 t)$ равна или $+1$, или -1 , то при переключениях изменится лишь полярность разности потенциалов U_B на C_B , т. е. вместо $y(\omega_0 t) C_B$ в эквивалентной схеме можно писать просто C_B , если одновременно учитывать изменение полярности разности потенциалов U_B на емкости C_B . Тогда заряд, накапливаемый на емкости C_C , может быть рассчитан по эквивалентной схеме рис. 5.

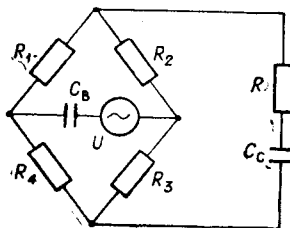


Рис. 3.

Заряд, протекающий через емкости C_C и C_B за время одного подключения, удовлетворяет уравнению

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{R C_{BC}} q + \frac{1}{R} E = 0,$$

где

$$C_{BC} = \frac{C_B C_C}{C_B + C_C}; \quad E = y E_l + U_C + U_B.$$

Функция E в интервале времени за одно подключение является непрерывной, $C_{BC} = \text{const}$, а начальные заряды на C_C и C_B учитываются в E в виде разностей потенциалов U_C и U_B , поэтому

$$q = - e^{-F(t)} \int_{t_n}^{t'} E e^{F(t)} dt, \quad (2)$$

где

$$q_0 = 0; \quad F(t) = \int_{t_n}^t \frac{1}{R C_{BC}} dt = \frac{t - t_n}{R C_{BC}};$$

$$t_n = \left(n - \frac{1}{2}\right) \tau + (n - 1) \Delta t; \quad t'_n = \left(n - \frac{1}{2}\right) \tau + n \Delta t.$$

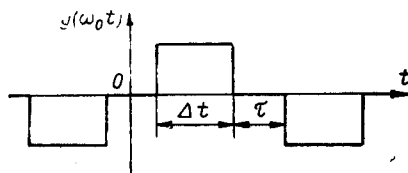


Рис. 4.

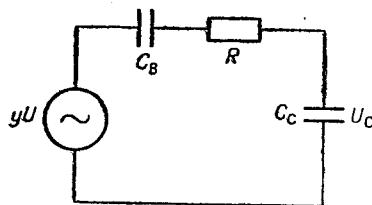


Рис. 5.

Для первого подключения имеем:

$$E = yEl; U_B = U_C = 0;$$

$$q_1 = -\frac{1}{R} e^{-\frac{\Delta t}{RC_{BC}}} \int_{t_1}^{t_1'} y E l e^{\frac{t-t_1}{RC_{BC}}} dt.$$

Заряд q_1 на C_B и C_C создаст разности потенциалов

$$U_{B1} = \Delta U_{B1} = \frac{q_1}{C_B}; \quad U_{C1} = \Delta U_{C1} = \frac{q_1}{C_C}.$$

Для второго подключения, учитывая, что емкость C_B переключалась и U_{B1} имеет обратную полярность, получим:

$$E = yEl + U_{C1} - U_{B1};$$

$$q_2 = -C_{BC} (U_{C1} - U_{B1}) (1 - e^{-\frac{\Delta t}{RC_{BC}}}) - \frac{1}{R} e^{-\frac{\Delta t}{RC_{BC}}} \int_{t_2}^{t_2'} y E l e^{\frac{t-t_2}{RC_{BC}}} dt.$$

На C_B и C_C возникнут разности потенциалов:

$$U_{B2} = -U_{B1} + \Delta U_{B2} = -U_{B1} + \frac{q_2}{C_B};$$

$$U_{C2} = U_{C1} + \Delta U_{C2} = U_{C1} + \frac{q_2}{C_C}.$$

Для n -го подключения $E = yEl + U_{C(n-1)} - U_{B(n-1)}$;

$$q_n = -C_{BC} (U_{C(n-1)} - U_{B(n-1)}) (1 - e^{-\frac{\Delta t}{RC_{BC}}}) - \frac{1}{R} e^{-\frac{\Delta t}{RC_{BC}}} \int_{t_n}^{t_n'} y E l e^{\frac{t-t_n}{RC_{BC}}} dt, \quad (3)$$

где

$$U_{B(n-1)} = -U_{B(n-2)} + \frac{q_{(n-1)}}{C_B}; \quad U_{C(n-1)} = U_{C(n-2)} + \frac{q_{(n-1)}}{C_C}.$$

Таким образом, выражение для U_{Cn} получим в виде ряда из интегралов типа (2), но оно совершенно необозримо. Однако, имея зависимость q_n от n и применяя интегрирование по n , можно найти более простое выражение для U_{Cn} . Для этого запишем

$$q_n = \frac{\Delta Q}{\Delta n}, \quad U_{C(n-1)} = \frac{Q}{C_C}, \quad U_{B(n-2)} = \frac{q_{B(n-2)}}{C_B}$$

и приближенно будем считать, что

$$q_n \approx q_{n-1}, \quad U_{C(n-2)} = U_{C(n-1)} - \frac{q_{(n-1)}}{C_C} \approx U_{C(n-1)} - \frac{q_n}{C_C}.$$

Подставив эти выражения и

$$U_{B(n-1)} = -U_{B(n-2)} - \frac{C_c}{C_c + C_B} (U_{C(n-2)} - U_{B(n-2)}) \times \\ \times (1 - e^{-\frac{\Delta t}{RC_{BC}}}) - \frac{1}{R} e^{-\frac{\Delta t}{RC_{BC}}} \int_{t_{n-1}}^{t'_{n-1}} y E l e^{\frac{t-t_{n-1}}{RC_{BC}}} dt.$$

в (3), используя обозначения

$$\xi = \frac{C_B}{C_B + C_c}, \quad \eta = \frac{C_c}{C_B + C_c}, \quad \zeta = 1 - e^{-\frac{\Delta t}{RC_{BC}}}, \quad k = \frac{\Delta t}{RC_{BC}}$$

и переходя от конечных разностей к непрерывным значениям, получим линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами и свободными членами, зависящими от n :

$$(1 - \xi\eta\zeta^2) \frac{dQ}{dn} = -\xi\zeta(1 + \eta\zeta) Q - \eta\zeta \frac{e^{-k}}{R} \int_{t_{n-1}}^{t'_{n-1}} y E l e^{\frac{t-t_{n-1}}{RC_{BC}}} dt - \\ - \frac{e^{-k}}{R} \int_{t_n}^{t'_n} y E l e^{\frac{t-t_n}{RC_{BC}}} dt - \eta\zeta(1 - \eta\zeta) q_{B(n-2)}.$$

При $n=0$ $Q=Q_0=0$ и аналогично (2) имеем

$$Q = - \frac{e^{-mN-k}}{R(1 - \xi\eta\zeta^2)} \int_0^N e^{mn} \left(\int_{t_n}^{t'_n} y E l e^{\frac{t-t_n}{RC_{BC}}} dt + \right. \\ \left. + \eta\zeta \int_{t_{n-1}}^{t'_{n-1}} y E l e^{\frac{t-t_{n-1}}{RC_{BC}}} dt \right) dn + q_B. \quad (4)$$

Здесь

$$m = \frac{\xi\zeta(1 + \eta\zeta)}{1 - \xi\eta\zeta^2}; \quad q_B = - \frac{\eta\zeta(1 - \eta\zeta)}{1 - \xi\eta\zeta^2} e^{-mN} \int_0^N e^{mn} q_{B(n-2)} dn.$$

Заряд $q_{B(n-2)}$ на переключаемой емкости C_B имеет знакопеременную величину, поэтому q_B не будет существенно влиять на процесс накопления, и его значение в (4) можно опустить. Для гармонического сигнала $E = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$ и функции переключения (1) после несложных, но громоздких операций по интегрированию (4) получаем

$$U_c = \frac{Q}{C_c} = \frac{2}{\pi} \frac{E_0 l}{\zeta(1 + \eta\zeta)} \sum_{i=1, 3, 5 \dots} \frac{1}{i} \cos i \omega_0 \tau \times$$

$$\left[1 + \frac{(i\omega_0 + \omega)^2 (\tau + \Delta t)^2}{m^2} \right]^{1/2} \left[1 + R^2 C_{\text{вс}}^2 (i\omega_0 + \omega)^2 \right]^{1/2} \Bigg\}$$

где

$$C_1 = \cos \left\{ (i\omega_0 - \omega) \left[(\tau + \Delta t) N - \frac{\tau}{2} \right] + \psi_1 + \theta_1 - \varphi \right\} + \\ + \eta \zeta \cos \left\{ (i\omega_0 - \omega) \left[(\tau + \Delta t) N - \frac{3}{2} \tau - \Delta t \right] + \psi_1 + \theta_1 - \varphi \right\};$$

$$C_1' = \cos \left[(i\omega_0 - \omega) \frac{\tau}{2} - \psi_1 - \theta_1 + \varphi \right] + \eta \zeta \cos \times \\ \times \left[(i\omega_0 - \omega) \left(\frac{3}{2} \tau + \Delta t \right) - \psi_1 - \theta_1 + \varphi \right];$$

$$C_2 = \cos \left\{ (i\omega_0 - \omega) \left[(\tau + \Delta t) N - \frac{\tau}{2} - \Delta t \right] + \psi_1 + \theta_1 - \varphi \right\} + \\ + \eta \zeta \cos \left\{ (i\omega_0 - \omega) \left[(\tau + \Delta t) N - \frac{3}{2} \tau - 2 \Delta t \right] + \psi_1 + \theta_1 - \varphi \right\};$$

$$C_2' = \cos \left[(i\omega_0 - \omega) \left(\frac{\tau}{2} + \Delta t \right) - \psi_1 - \theta_1 + \varphi \right] + \eta \zeta \cos \times \\ \times \left[(i\omega_0 - \omega) \left(\frac{3}{2} \tau + 2 \Delta t \right) - \psi_1 - \theta_1 + \varphi \right].$$

Выражения для C_3, C_3', C_4, C_4' получаются соответственно из C_1, C_1', C_2, C_2' при замене $i\omega_0 - \omega, \psi_1, \theta_1, \mp \varphi$ соответственно на $i\omega_0 + \omega, \psi_2, \theta_2, \pm \varphi$, причем

$$\psi_1 = \text{arctg} \frac{1}{RC_{\text{вс}} (i\omega_0 - \omega)}; \quad \psi_2 = \text{arctg} \frac{1}{RC_{\text{вс}} (i\omega_0 + \omega)};$$

$$\theta_1 = \text{arctg} \frac{m}{(i\omega_0 - \omega) (\tau + \Delta t)}; \quad \theta_2 = \text{arctg} \frac{m}{(i\omega_0 + \omega) (\tau + \Delta t)}.$$

Из этого выражения вытекает следующее.

Процесс синхронного накопления сочетает в себе особенности синхронного детектирования сигналов и экспоненциального накопления зарядов на емкости.

Значение U_c будет максимальным при $\varphi = 0$ для э. д. с. с частотами, равными частоте переключения и нечетным гармоникам частоты переключения.

Зависимости U_c от $i\omega_0 \pm \omega, m$ и R таковы, что для повышения чувствительности к э. д. с. частоты $\omega = i\omega_0$ целесообразнее брать $R = 0$. При этом $k = \infty, \zeta = 1$ и значение U_c будет определяться лишь членами, содержащими в числителе C_1 и C_1' .

$$U_c = \frac{2}{\pi} \frac{E_0 l}{1 + \eta} \sum_{i=1, 3, 5, \dots} \frac{1}{i} \cos i \omega_0 \tau \frac{C_1 - C_1' e^{-m N}}{\left[1 + \frac{(i\omega_0 - \omega)^2 (\tau + \Delta t)^2}{m^2} \right]^{1/2}}.$$

Для устранения нежелательной чувствительности к э. д. с., имеющим частоты, равные частотам высших гармоник переключения, необходимо, чтобы функция переключения $y(\omega_0 t)$ имела $\tau = \frac{1}{5} \Delta t$. При этом чувствительность к третьей гармонике будет равна нулю ($\cos 3\omega_0 \tau = 0$). Подавление пятой и более высоких гармоник необходимо осуществлять

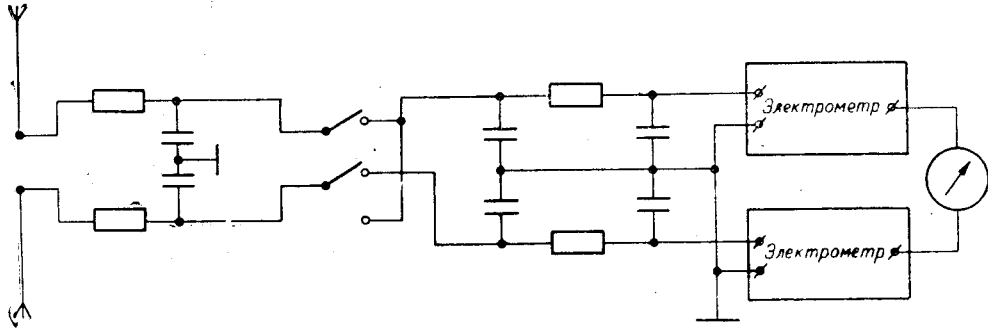


Рис. 6.

RC-фильтрами нижних частот еще до подачи этих э. д. с. на переключатель накопителя, т. е. на выходе датчика (см. рис. 2, 6). Выражение для U_c при этом можно представить приближенно в виде

$$U_c \approx \frac{\sqrt{3}}{\pi} \frac{E_0 l}{1 + \eta} \frac{C_1 - C_1' e^{-mN}}{\left[1 + \frac{(\omega_0 - \omega)^2 (\tau + \Delta t)^2}{m^2}\right]^{1/2}}.$$

Частотная характеристика системы будет определяться в последнем случае выражением

$$\left[1 + \frac{(\omega_0 - \omega)^2 (\tau + \Delta t)^2}{m^2}\right]^{1/2},$$

т. е. будет симметричной относительно ω_0 .

Ширина полосы пропускания системы на уровне 0,71 будет равна

$$\Delta f = \frac{m}{\pi (\tau + \Delta t)} = \frac{2}{\pi} m f.$$

При $R = 0$, $\zeta = 1$

$$\Delta f = \frac{2}{\pi} \frac{\xi (1 + \eta)}{1 - \xi \eta} f.$$

Максимальная ширина полосы достигается при $\xi = 0,73$, $C_b \approx 2,7 C_c$ и равна $\Delta f = 0,73 f$. Минимальная Δf будет определяться минимальным значением внутренней емкости датчика C_b .

Количество переключений N , необходимое для получения максимума U_c , обуславливается значением m .

При $\varphi = 0$, $R = 0$, $\omega = \omega_0$

$$U_c \approx - \frac{\sqrt{3}}{\pi} (1 - e^{-mN}) E_0 l,$$

а при $mN \gg 1$

$$U_c \approx 0,6 E_0 l.$$

Множитель $0,6(1 - e^{-mN})$ можно оценивать как степень согласования полных сопротивлений датчика и измерительной системы. Во всем интервале значений ξ, η от 0 до 1 за счет времени накопления ($e^{-mN} \ll 1$) возможно достижение степени согласования 0,6, т. е. возможно согласование полных сопротивлений, практически не зависящее от соотношения между C_B и C_C .

В случае несимметричного вертикального диполя в (5) вместо длины l необходимо подставлять $2l$; при этом количество подключений N соответственно будет вдвое меньше, но в результате величина U_c почти удвоится.

Экспериментальная проверка метода синхронного накопления была успешно осуществлена по схеме рис. 6. Обстоятельное изложение эксперимента по объему составило бы самостоятельную статью, поэтому здесь мы отметим только некоторые его детали, имеющие отношение к публикуемому материалу.

В схеме имеет место несоответствие между несимметричностью входа электрометра и симметричностью накопителя. Поэтому независимо от наличия или отсутствия симметрии датчика использовались два электрометрических усилителя. Выход этих усилителей контролировался одним стрелочным прибором (самописцем).

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Я. Беркман, В. Н. Михайловский. Измерение магнитных плей низкой частоты при геофизической разведке.— Изв. АН СССР, 1959, № 6.
2. А. П. Лысенко, Н. Ф. Соколов, Б. З. Михлин. О методах измерений слабых магнитных полей в широком спектре частот.— Геофизическое приборостроение, вып. 9. Л., Гостоптехиздат, 1961.

*Поступила в редакцию
22 апреля 1966 г.,
окончательный вариант —
29 июня 1966 г.*

U. S. Valeyev

MEASUREMENT

OF AIR INFRASONIC FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS BY SYNCHRONOUS CAPACITIVE ACCUMULATING OF CHARGES

It is revealed that detection of weak electromagnetic fields of infrasonic frequency from some source through electrical component is preferable under certain conditions of measurement than it does through magnetic component. Process of synchronous accumulating the charges by capacitor is considered. It is established that the method provides conditions which are necessary for effective measurement.