

УДК 621.317.79

И.Б. Широков, доцент, канд. техн. наук

Е.А. Редькина, доцент, канд. техн. наук

М.А. Дурманов, инженер

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: shirokov@ieee.org

МИНИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПОИСКА ПОД ЗАВАЛОМ В ШАХТАХ

Рассмотрен итерационный метод минимизации ошибки определения местоположения объекта поиска под завалом в шахте, производимого с помощью поискового оборудования, работа которого основана на использовании проникающей способности переменного магнитного поля низкой частоты. Метод основан на коррекции коэффициента пропорциональности вычислителя координат, который зависит от взаимного положения антенных катушек радиомаяка и поискового устройства.

Ключевые слова: погрешность, магнитная антенна, магнитное поле, местоположение, итерационный метод, поиск людей под завалами.

При авариях в шахтах, которые нередко сопровождаются обвалами горных пород, возникает ситуация, когда персонал шахты локализуется в пределах изолированных участков выработок за завалами горных пород. В этих условиях эффективность работ по ликвидации последствий подземных аварий могла бы быть существенно повышена, если бы в распоряжении горноспасательных подразделений имелись поисково-информационные средства для осуществления контакта с потерпевшими за завалами и для локализации местоположения людей, которые попали непосредственно в зону завалов. Средства локализации потерпевших в завалах содействовали бы спасению жизни многим из них, а также снижению экономических затрат связанных с ликвидацией последствий аварий в шахтах.

При организации поиска людей под завалами в шахтах необходимо учитывать сильное затухание электромагнитных волн, обусловленное потерями электромагнитной энергии, при их распространении через массив горных пород. Кроме того, имеет место сложная зависимость затухания электромагнитных колебаний от частоты излучения и электрических параметров среды. Указанное выше ограничивает дальность действия подземных радиотехнических систем в сравнении с наземными и усложняет определение местоположения объекта поиска.

В работах [1–3] описан подход к поиску людей под завалами, предполагающий использование проникающих свойств переменного магнитного поля низкой частоты в толще горных пород, рассмотрены аспекты построения радиотехнической системы поиска людей под завалами в шахтах. С практической стороны с помощью данной радиотехнической системы решается задача оказания своевременной помощи и спасения пострадавших и обеспечение безопасности проведения поисково-спасательных мероприятий. При этом к точности такой системы предъявляются повышенные требования, обусловленные необходимостью повышения эффективности проведения мероприятий поиска людей под завалами и ликвидации последствий аварии.

Целью работы является уменьшение погрешности измерения расстояний до объекта поиска радиотехнической системой, функционирование которой основано на использовании проникающих свойств переменного магнитного поля низкой частоты.

Система поиска людей под завалами состоит из одного или нескольких поисковых устройств, устройства активации и радиомаяка. Последний встроен в аккумуляторный блок шахтерского фонаря. Радиомаяк представляет собой приемопередатчик, который по сигналу запроса от устройства активации формирует и передает гармонический низкочастотный сигнал. По уровню принятого поисковым устройством сигнала радиомаяка определяют координаты радиомаяка методом триангуляции, в соответствии с которым первоначально измеряют расстояние от радиомаяка до нескольких точек.

Расстояние до объекта поиска с помощью данной системы определяют амплитудным методом, согласно которому определяют первоначально зависимость уровня принимаемого сигнала от расстояния между передающей и приемной катушками. Введем понятие угла α между направлением оси каждой из катушек и прямой, соединяющей их центры. При этом расчет расстояния между катушками проводят для случая их соосного расположения в одной плоскости, $\alpha = 0^\circ$ (рисунок 1, а).

При соосном расположении катушек магнитное поле, создаваемое передающей катушкой, вызывает появление в приемной катушке ЭДС индукции максимальной величины. Этот эффект объясняется тем, что направление вектора магнитной индукции поля, создаваемого внутри одной

катушки, фактично совпадає з осью другої. В цьому випадку вертикальна складова вектора \vec{B} є найбільшою, а саме вона створює наводимий в катушці ток.

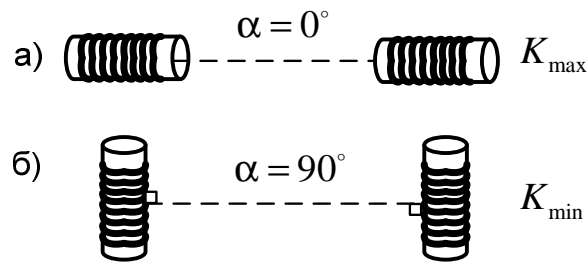


Рисунок 1 — Два варіанта взаємного розташування двох катушок: а) соосне; б) паралельне

Експериментально було визначено ще одне взаємне положення передаючої і приймаючої катушок, при якому спостерігався максимум приймаемого сигналу. Це положення відповідає випадку, коли пряма, що з'єднує центри катушок, перпендикулярна осям кожної з катушок (рисунок 1, б). Назвемо його паралельним розташуванням катушок, при якому кут $\alpha = 90^\circ$. Рівень приймаемого сигналу при цьому трохи менше, ніж рівень приймаемого сигналу при соосному розташуванні катушок.

Експериментально були отримані залежності рівня приймаемого сигналу від відстані між катушками при відомому куті взаємного положення катушок, показані на рисунку 2. Перша крива показує залежність рівня сигналу, приймаемого катушкою пошукового пристрою, від відстані між нею і катушкою радіомаяка в разі їх соосного розташування, а друга — залежність рівня приймаемого сигналу від відстані в разі їх паралельного розташування.

Оскільки положення передаючої магнітної катушки (радіомаяка) в просторі не може бути заздалегідь визначено, так як радіомаяк знаходиться у шахтера, якого необхідно знайти, кут α заздалегідь невідомий. В цьому випадку, повертаючи катушку пошукового пристрою, досягаються отримання максимального рівня приймаемого сигналу. При цьому орієнтація катушки пошукового пристрою буде відповідати деякому проміжному положенню, в загальному випадку відмінному від соосного або паралельного, при якому спостерігається один з максимумів приймаемого сигналу. При такому положенні прийомної і передаючої катушок рівень приймаемого сигналу буде відрізнятися (в сторону зменшення) від максимального можливого рівня, характерного для випадку соосного розташування катушок.

Із кривих, показаних на рисунку 2, видно, що характер їх поведінки близький до функції $1/x^3$, де x — відстань між катушками.

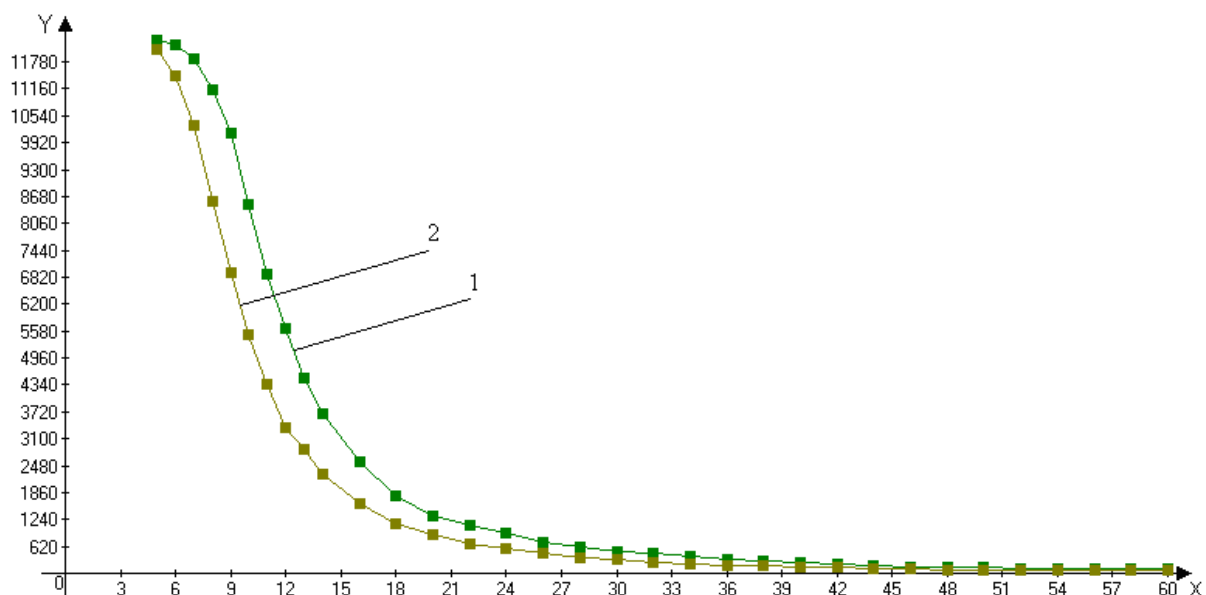


Рисунок 2 — Експериментальні залежності рівня приймаемого сигналу від відстані між катушками: 1 — при соосному розташуванні катушок; 2 — при паралельному розташуванні катушок

При расстояниях между катушками менее 5 м наблюдался эффект компрессии сигнала, вызванный нелинейностью усилителя приемного устройства (ограничение динамического диапазона сверху). При расстояниях более 40 м наблюдалась зона увеличения погрешности определения расстояния, вызванная шумами приемного устройства (ограничение динамического диапазона снизу). И то и другое явления — предмет дальнейших исследований и улучшений, которые могут быть достигнуты техническими средствами.

Инструментальная погрешность измерения дальности для каждого варианта расположения катушек определяется возможностями поискового устройства. С учетом возможности микропроцессорной обработки сигнала и калибровки устройства в целом эта погрешность может составлять (1...2) м при дальности до 40 м и (5...10) м при дальности более 40 м. Уменьшение этой погрешности при больших расстояниях возможно также с помощью организационных мер. Определив значительное расстояние с большой погрешностью, повторно проводится операция измерения дальности в месте, определенном при первом измерении, но уже с более точным результатом.

Вместе с тем, величина системной погрешности, обусловленной неопределенностью угла взаимного положения катушек α , может существенно превышать указанные выше значения при любых расстояниях между катушками. Другими словами, заранее неизвестно, какой экспериментальной кривой (см. рисунок 2) необходимо пользоваться при определении расстояния между катушками, найденному в результате измерения уровня принимаемого сигнала.

Рассмотрим метод минимизации системной погрешности определения расстояния, вызванной неопределенностью угла взаимного расположения передающей и приемной катушек системы. Для минимизации указанной ошибки был разработан специальный итерационный алгоритм, основанный на проведении нескольких последовательных операций определения дальности, с учетом результатов каждой предыдущей итерации [6].

Согласно теоретическим [4, 5] и практическим [3] исследованиям, сигнал, наведенный в приемной катушке поисковой системы, при возбуждении передающей катушки радиомаяка, однозначно связан с расстоянием между приемной и передающей катушками следующей зависимостью

$$U_i(t) = \left(\frac{K}{L^b} \right) \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где L — расстояние между катушками; b — показатель степени аппроксимирующей функции; K — коэффициент пропорциональности, зависящий от амплитуды напряжения возбуждения передающей катушки, частоты возбуждения, числа витков обеих катушек, их диаметра, длины и магнитной проницаемости ферромагнитных сердечников; φ_0 — начальная фаза возбуждающих колебаний; ω — круговая частота сигнала возбуждения радиомаяка.

При настройке на максимум принимаемого сигнала подвижная катушка поискового устройства и катушка радиомаяка не всегда будут ориентированы либо соосно, либо параллельно. Отклонение от одного из двух взаимных положений катушек ведет к уменьшению (при соосном) или увеличению (при параллельном) уровня принимаемого сигнала, а, следовательно, к увеличению (или уменьшению) некоторого фантомного вычисляемого расстояния, фактическое значение которого остается неизменным. Таким образом, коэффициент K является не только коэффициентом пропорциональности, но также должен учитывать отклонения положения катушек относительно соосного или параллельного положений. При этом коэффициент K будет иметь максимальное значение K_{max} при соосном положении катушек и, соответственно, минимальное K_{min} — при параллельном (рисунок 1).

Для определения коэффициента пропорциональности и показателя степени убывания уровня сигнала от расстояния была проведена аппроксимация экспериментальных зависимостей, показанных на рисунке 2, с помощью программы Advanced Grapher 2.2. Для этого была использована показательная функция аппроксимации. Аппроксимирующие функции для соосного и параллельного расположений катушек имеют вид:

$$U_1 = \frac{K_{max}}{L^b};$$

$$U_2 = \frac{K_{min}}{L^b}.$$

Аппроксимирующие функции, упомянутые выше, вместе с экспериментальными точками показаны на рисунке 3 и имеют следующие значения коэффициентов $K_{max} = 2,814 \cdot 10^6$, $K_{min} = 1,628 \cdot 10^6$ и $b = -2,5$.

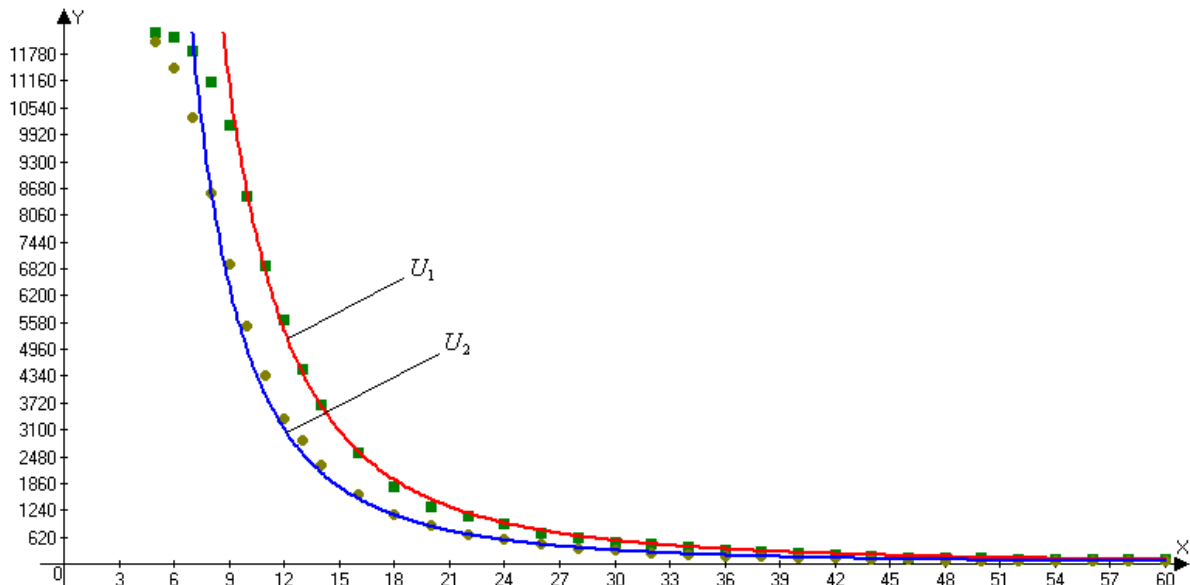


Рисунок 3 — Аппроксимация экспериментальных зависимостей уровня сигнала на клеммах приемной катушки от расстояния между катушками при их соосном и параллельном взаимном расположениях

Таким образом, аппроксимирующие функции, построены относительно переменной x , имеют следующий вид:

$$U_1(x) = 2,814 \cdot 10^6 \cdot x^{-2,5};$$

$$U_2(x) = 1,628 \cdot 10^6 \cdot x^{-2,5}.$$

Рассмотрим более подробно итерационный алгоритм минимизации ошибки поиска людей под завалами в шахтах [6].

Антенна радиомаяка излучает переменное магнитное поле, которое принимает подвижная антенна поискового устройства. Принятый сигнал усиливают в узкой полосе частот, выпрямляют и выпрямленный сигнал подают на измеритель уровня. Далее производят вращение подвижной катушки поискового устройства и одновременно измеряют уровень принимаемого сигнала. Эту операцию производят до тех пор, пока не будет достигнут максимальный уровень принимаемого сигнала. Угол положения катушки φ , соответствующий максимальному уровню принимаемого сигнала, фиксируют относительно известного направления, например, на Север магнитного поля Земли (N) и запоминают (см. рисунок 4). Предполагая, что катушки поискового устройства и радиомаяка ориентированы либо соосно, либо параллельно, с помощью аппроксимирующих функций $U_1(x)$ или $U_2(x)$ определяют расстояние между ними. Эту операцию выполняют в трех точках пространства и определяют три расстояния, по которым методом триангуляции вычисляют гипотетическое направление на объект поиска (угол θ). Это направление является линией отсчета при коррекции определяемой дальности и азимута объекта поиска.

Угол α , показанный на рисунке 4, определяют, исходя из следующих соотношений: $\alpha = \theta - \varphi$ — для близкого к соосному взаимному расположению катушек ($\theta = \varphi$ — ситуация соосного положения, когда $\alpha = 0^\circ$) и $\alpha = \varphi - \theta$ — для близкого к параллельному положению ($\varphi - \theta = 90^\circ$ — ситуация параллельного положения, когда $\alpha = 90^\circ$).

Чтобы установить зависимость коэффициента K от угла α , были проведены экспериментальные исследования и снята соответствующая номограмма [3], с помощью которой получаем возможность корректировать значение дальности и соответственно азимута объекта поиска. Для этого была проведена аппроксимация данных экспериментальной зависимости уровня принимаемого сигнала от углового взаимного расположения катушек α в пределах $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ (для других значений углов α форма аппроксимирующей кривой будет симметрично повторяться).

Функция аппроксимации имеет вид

$$Y_{lsp}(\alpha) = \text{interp}(\text{cspline}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \alpha),$$

где \mathbf{X} — массив значений угла α ; \mathbf{Y} — массив данных нормировочного коэффициента K , который меняется в пределах $K_{\min} \leq K \leq K_{\max}$. Результаты аппроксимации получены с помощью программного пакета Mathcad.

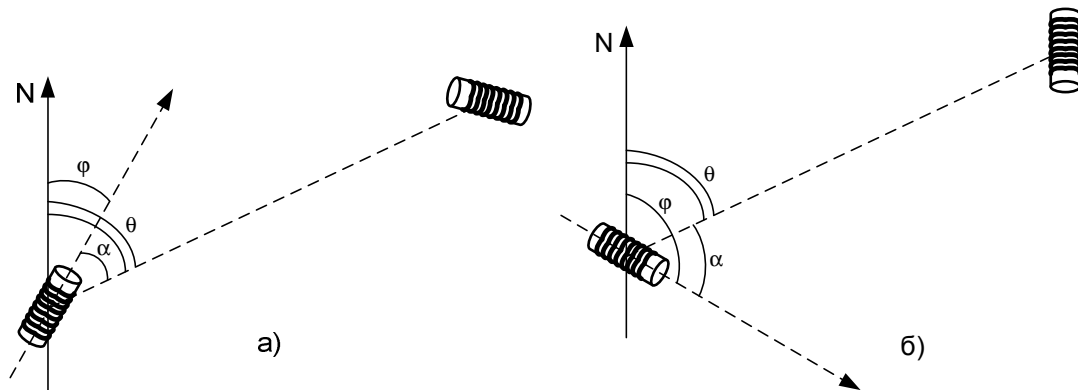


Рисунок 4 — Схемы двух возможных взаимных расположений передающей и приемной катушек при использовании итерационного алгоритма минимизации ошибки поиска

Аппроксимирующая функция $Y_{lsp}(\alpha)$ построена в полярных координатах на рисунке 5.

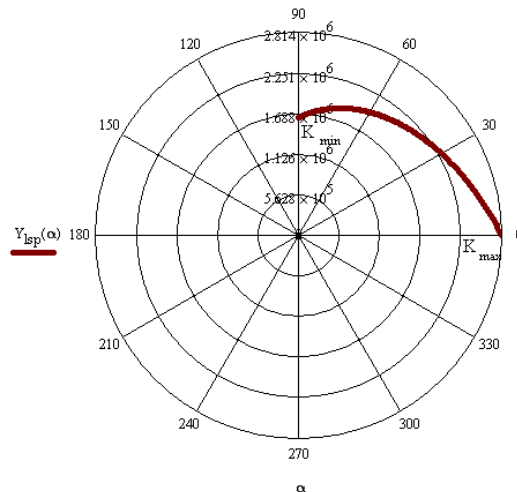


Рисунок 5 — Аппроксимирующая функция экспериментальной зависимости уровня принимаемого сигнала от относительного расположения передающей и приемной катушек

Работу итерационного алгоритма рассмотрим в предположении, что катушки параллельны друг другу, как это показано на рисунке 1, б, и, следовательно, наблюдается максимум принимаемого сигнала. Если при этом катушки реально будут сосны, то будет иметь место максимальная погрешность определения расстояния, так как дальность будет определяться согласно аппроксимирующей функции $U_1(x)$ вместо $U_2(x)$.

Проведя измерение сигнала в двух точках, между которыми известно расстояние b (база системы), определим два расстояния с помощью функции $U_1(x)$ — R'_1 и R'_2 (см. рисунок б). Для упрощения расчетов прямая b перпендикулярна известному направлению N . Измерение в третьей точке можно исключить, если известна полуплоскость, в которой непосредственно находится объект поиска.

По трем известным сторонам (R'_1 , R'_2 и b) определяем угол β' , используя следующее выражение

$$\beta' = \arcsin \frac{2\sqrt{p(p-b)(p-R'_1)(p-R'_2)}}{b \cdot R'_1},$$

где $p = \frac{b + R'_1 + R'_2}{2}$.

По рассчитанному углу θ' ($\theta' = 90 - \beta'$) и измеренному ϕ определяем угол α

$$\alpha = \theta' - \phi.$$

От величины угла α зависит точность проведенных измерений дальностей при первой итерации, т.е. указывается на отклонение найденного направления относительно соосного, по которому ведется расчет. Если этот угол близок к 0° , то аппроксимирующая функция близка к реальной, следовательно, погрешность определения дальности мала и ось катушки указывает направление поиска.

Если угол $\alpha > 0$, требуется коррекция коэффициента пропорциональности K согласно функции аппроксимации $K(\alpha)$ (рисунок 5) в соответствии с этим углом. Очевидно, при этом, что происходит смещение определяемого азимута относительно гипотетического направления, соответствующего соосному положению, на угол α .

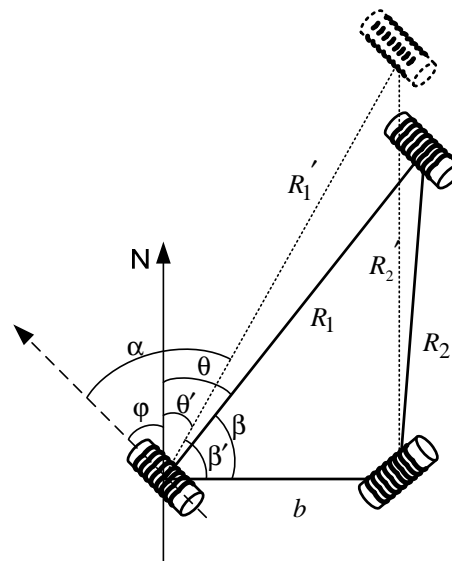


Рисунок 6 — Диаграмма измерения дальности в двух точках при первой итерации

Проведя коррекцию коэффициента K , выполняем следующую итерацию. Новый коэффициент обозначим как K' . Далее подставляем его в аппроксимирующую функцию $U_1(x)$ и получаем новую функцию $U_1'(x) = K' \cdot x^{-2.5}$, по которой определяем скорректированные значения расстояний R_1'' и R_2'' ; и, аналогично, методом триангуляции находим угол θ'' , а далее — α' . Новое значение α' используется для определения коэффициента K'' . Аналогичным образом выполняется третья и последующие итерации. Итерации производятся до тех пор, пока изменение расстояний и углов при каждой последующей не станет меньше допустимой погрешности определения дальности и азимута объекта поиска.

Для качественного анализа уменьшения погрешности при каждой новой итерации рассмотрим пример. Зададимся известными расстояниями между катушками при двух измерениях: $R_1 = 20$ м и $R_2 = 18$ м, расстоянием между точками проведения измерений $b = 10$ м и взаимным положением катушек таким, как показано на рисунке 6. В этом случае, как уже отмечалось раньше, погрешность будет максимальной. По рисунку 3 находим истинное значение уровня напряжения сигнала, соответствующее R_1 и R_2 : $U_2(20) = 859$ и $U_2(18) = 1107$. По этим значениям напряжения по функции, построенной для соосного взаимного положения, определяем расстояния $R_1' = 24,8$ м и $R_2' = 22,56$ м. Определим величину максимальной ошибки для одного из рассчитанных расстояний. Абсолютная погрешность будет равна $\Delta r = R_1' - R_1 = 4,8$ м, а относительная $\delta r = \frac{R_1' - R_1}{R_1} \cdot 100\% = 24\%$. Поскольку погрешности превышают допустимые значения ($\Delta r_d = (1...2)$), то далее выполняем расчет, согласно приведенной методике. По рассчитанным расстояниям R_1' и R_2' находим угол β' . $\beta' = 65,45^\circ$ и, следовательно, $\theta' = 90 - \beta' = 24,55^\circ$. Теперь необходимо определить угол α . Неизвестной величиной является угол ϕ . Его можно определить, используя исходные данные: $\phi = -\beta$, где β — угол в треугольнике со сторонами R_1 и R_2 (см. рисунок 6) и равен $63,9^\circ$.

Таким образом, $\alpha = \theta' - (-\beta) = 88,45^\circ$. Отсюда видно, что выбранный нами коэффициент пропорциональности K не соответствует истинному (что вполне очевидно). Теперь проводим коррекцию коэффициента пропорциональности, используя рисунок 5. $K' = 1,6538 \cdot 10^6$. С помощью функции $U_1'(x) = K' x^{-2.5}$ определяем R_1'' и R_2'' . $R_1'' = 20,16$ м и $R_2'' = 18,24$ м. Найдем абсолютную погрешность определения расстояния $\Delta r' = 0,16$ м и относительную $\delta r' = 0,8\%$. Таким образом, после

первой же итерации, благодаря коррекции, удалось достичь требуемую точность определения дальности, следовательно, проведение последующих итераций нецелесообразно.

Для анализа погрешности на большом расстоянии, где возможна большая ошибка, зададимся новыми исходными данными: $R_1 = 40$ м и $R_2 = 35$ м с прежней базой $b = 10$. По выбранной методике получим следующие расчетные расстояния: $R'_1 = 50$ м, $R'_2 = 43,56$ м. Определим погрешности: $\Delta r = 10$ м и $\delta r = 25\%$.

Проведем коррекцию коэффициента пропорциональности. В результате получим новые расстояния, которые будут равны: $R''_1 = 41,4$ м и $R''_2 = 36$ м. Погрешность при первой итерации будет равна: $\Delta r' = 1,4$ м и $\delta r' = 3,5\%$. Полученные значения погрешности определения расстояния, в принципе удовлетворяют предъявляемым требованиям, которые, как правило, составляют (1...2) м. Тем не менее, после второй итерации, погрешность определения координат будет равна: $\Delta r'' = 0,68$ м и $\delta r'' = 1,7\%$, что существенно меньше требуемой.

Таким образом, использование итерационного метода позволяет уменьшить ошибку определения координат объекта поиска. Описанный подход к решению этой задачи может быть исключительно полезным при поиске людей под завалами в шахтах.

В дальнейших исследованиях планируется найти пути расширения динамического диапазона системы для уменьшения инструментальной погрешности определения координат объекта поиска.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Широков И.Б. Система поиска людей под завалами / И.Б. Широков, М.А. Дурманов, А.М. Сербин // Зб. наук. пр. Севастоп. військ.-мор. інст. ім. П.С. Нахімова. — Севастополь, 2007. — Вип. 1 (11). — С. 152–160.
2. Широков И.Б. Определение координат объекта поиска при проведении поисково-спасательных мероприятий / И.Б. Широков, М.А. Дурманов // Радиотехника: всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Харьк. нац. универ. радиоэлектроники. — Харьков, 2008. — Вып. 153. — С. 33–39.
3. Shirokov I.B. The Approach to a Problem of Search of People under Avalanches / I.B. Shirokov, M.A. Durmanov, A.I. Yaufman // Proc. Of XXIXth URSI General Assembly of the International Union Radio Science (URSI), Chicago (USA), 07–16 of August 2008. — 4 p.
4. Shirokov I.B. The calculation of magnetic field strength in inhomogeneous medium in tasks of people's searching under avalanches in mines / I.B. Shirokov, M.A. Durmanov, E.A. Redkina // Proc. of 2010 IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers, Eilat, Israel, 17–20 November 2010. — P. 134–137.
5. The calculation of magnetic field strength of magnetic antenna with ferromagnetic core in a task of people's search under avalanches / I.B. Shirokov, M.A. Durmanov, E.A. Redkina, L.O. Naumicheva // Proc. of 2011 the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Rome, Italy, 11–15 April 2011. — P. 1845–1848.
6. Пат. № 90072 Украина, МПК (2009) А62В 99/00. Итерационный способ поиска пострадавших под завалом / Широков И.Б., Дурманов М.А.; заявитель и патентообладатель И.Б. Широков. — №200905263; заявл. 26.05.2009; опубл. 25.03.2010, Бюл. № 6.

Поступила в редакцию 18.12.2013 г.

Широков І.Б., Редькіна О.О., Дурманов М.А. Шлях зменшення похибки визначення місцезнаходження об'єкту пошуку під/за завалом

Розглянутий ітераційний метод мінімізації помилки визначення місцезнаходження об'єкту пошуку під завалом в шахті, що виконується за допомогою пошукового пристрою, робота якого основана на використанні проникаючої здатності перемінного магнітного поля низької частоти. Метод оснований на корекції коефіцієнту пропорційності визначення координат, який залежить від взаємного положення антенних котушок радіомаяка і пошукового пристрою.

Ключові слова: похибка, магнітна антена, магнітне поле, ітераційний метод, пошук людей під завалами.

Shirokov I.B., Redkina E.A., Durmanov M.A. The way of decreasing of localization error of object under/behind avalanches

The iterative method to minimize the error in determining the location of the search object under the avalanches in the mine is considered. The search actions are produced using the equipment, the operation of which is based on the use of the penetrating properties of an alternating magnetic field of low frequency. The method is based on the correction of proportionality factor at coordinates calculations, which depends on the relative position of the antenna coil of the beacon and the antenna coil of search equipment.

Keywords: error, H-field antenna, magnetic field, iteration method, searching peoples under avalanches.