

*A. Yu. Vdovin*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*E. M. Markov*, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

### Optimization of Light Screens Position in Systems of Determining the Velocity and Ballistic Coefficient Using the Laser Transmitter

*The article is devoted to determining the optimum position of light screens in systems using laser emitter applied in determining the bullet velocity.*

**Keywords:** optimization, light screen, laser emitter, initial sensor, external ballistics.

Получено 04.07.14

УДК 528.088

**Т. А. Редькина**, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**Д. Г. Миловзоров**, кандидат технических наук, доцент, Уфимский государственный авиационный технический университет

**Р. Р. Садрутдинов**, ОАО «НПФ «Геофизика», Уфа

## О ПОГРЕШНОСТЯХ ГРАДИЕНТОМЕТРОВ С БИЭЛЕМЕНТНЫМИ ФЕРРОЗОНДОВЫМИ ДАТЧИКАМИ

*Предложено аналитическое решение построения градиентометров с биэлементными феррозондовыми датчиками. Представлены зависимости изменения сигнала от величины угла поворота феррозондовых датчиков и анализ их погрешностей.*

**Ключевые слова:** градиентометр, биэлементные феррозондовые датчики, математическая модель.

Область применения градиентометров, предназначенных для выявления локальных аномалий магнитных полей и контроля их параметров, достаточно широка [1]. При этом сами магнитные поля, как правило, подразделяются на слабые, параметры которых соизмеримы с естественным геомагнитным полем с индукцией порядка  $B_0 = 50$  мкТл, и сильные, индукция которых кратно превышает  $B_0$ . Градиентометры имеют одну важную конструктивную особенность, а именно – содержат в себе биэлементный магниточувствительный измерительный преобразователь в виде двух идентичных в идеальном случае датчиков, расположенных на определенном базовом расстоянии друг от друга, конкретное значение которого определяется условиями решаемой задачи, а выбор того или иного типа датчиков определяется нормируемыми метрологическими характеристиками (в первую очередь порогом чувствительности) и атрибутивной диаграммой направленности.

Из всего круга задач градиентометрии наибольший интерес представляет определение локальных неоднородностей сверхслабых магнитных полей в пределах естественных вариаций магнитосферы Земли (порядка 100 нТл). Это обусловлено рядом аспектов прикладного характера:

- естественная среда обитания биологических объектов;

- слабо выраженные ферромагнитные свойства твердых тел (остаточная намагниченность и коэрцитивная сила) и их габариты;

- пространственная доступность исследуемой локальной области, имеющая место при реализации

функций поиска, обнаружения и априорной оценки скрытых объектов вне зоны визуального (оптического) обзора (приповерхностного слоя грунтов, подводного расположения и др.).

Такие требования к градиентометрической аппаратуре определяют обоснованный выбор из всего спектра известных магниточувствительных датчиков именно феррозондовых измерительных преобразователей, обладающих рядом преимуществ:

- малый порог чувствительности (до единиц нТл);
- наличие диаграммы направленности;
- простота конструкции и высокая надежность;
- сравнительно невысокая стоимость.

Один из вариантов построения градиентометра представляет собой измерительную систему (ИС), структура которой показана на рис. 1. Основу системы составляют встречно включенные идентичные феррозондовые датчики  $F_1$  и  $F_2$ , которые позиционируются в корпусе на базовом расстоянии  $l$  друг от друга. При вертикальной оси корпуса ИС, в идеальном случае, оси чувствительности феррозондов  $F_1$  и  $F_2$  совпадают с продольной осью симметрии корпуса  $OZ$  и, соответственно, с направлением вектора ускорения свободного падения  $\vec{g}$ . При таком положении, при условии идентичности характеристик феррозондов  $F_1$  и  $F_2$ , выходной сигнал, определяемый как разность информационных сигналов с феррозондов  $t_1$  и  $t_2$ , в неискаженном магнитном поле будет всегда равен нулю независимо от пространственной ориентации корпуса. Иными словами, разностный сигнал  $\Delta t$  в данном случае является инвариантным к естественному геомагнитному полю.

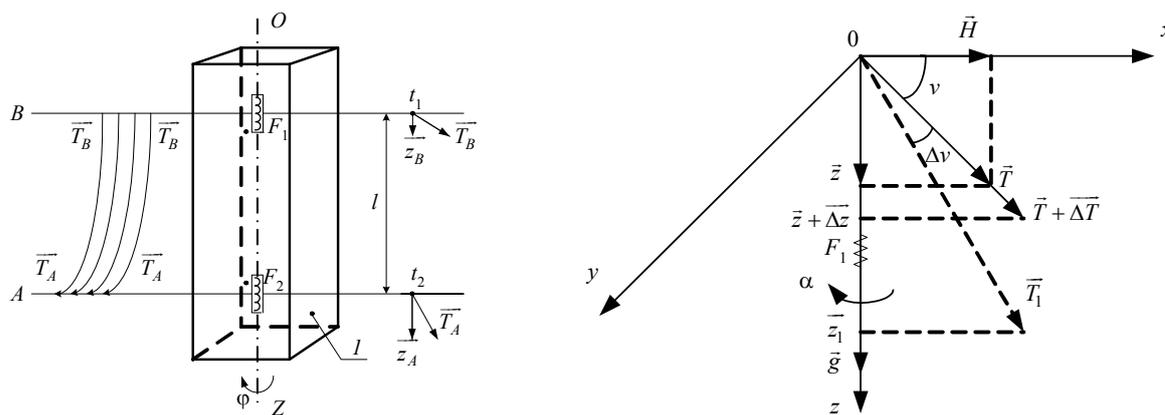


Рис. 1. Структурная схема градиентометра и основной базис  $R(O, X, Y, Z)$  и преобразование вектора  $\vec{T}$

На базовом расстоянии  $l$  между феррозондами  $F_1$  и  $F_2$  магнитное поле в точке  $A$  характеризуется вектором  $\vec{T}_A$ , а в точке  $B$  – вектором  $\vec{T}_B$ . Причем вертикальные составляющие векторов  $\vec{T}_A$  и  $\vec{T}_B$ , обозначенные как  $\vec{z}_A$  и  $\vec{z}_B$  и оказывающие непосредственное магнитное воздействие на сердечники феррозондов в отсутствии градиента магнитного поля, будут равны, что и обуславливает нулевое значение выходного сигнала  $\Delta t$ . При наличии градиента магнитного поля  $\text{grad}[\vec{T}]$  на базовом расстоянии  $l$  происходит в общем случае изменение вектора  $\vec{T}$  как по величине, так и по направлению. Вместе с этим изменяются сигналы с феррозондовых датчиков. В этом случае информационный разбаланс определяется неравенством  $t_1 \neq t_2$ , а разность сигналов  $\Delta t$  будет не равна нулю.

Частным случаем условий работы градиентометра является ламинарное магнитное поле с плоскопараллельными силовыми линиями, когда имеет место изменение только величины вектора магнитной индукции  $\vec{T}$ .

При решении задач градиентометрии и в частности при математическом описании подобной системы необходимо ввести базисы и рассмотреть их пространственные преобразования (рис. 1). Ось  $OZ$  является вертикальной и совпадает с вектором ускорения свободного падения  $\vec{g}$ . Ось  $OX$  лежит в горизонтальной плоскости и направлена на север магнитного меридиана. Полный вектор магнитной индукции  $\vec{T}$  раскладывается на горизонтальную  $\vec{H}$  и вертикальную  $\vec{z}$  проекции. Угол  $v$ , называемый углом магнитного наклона для данной широты местности, лежит в вертикальной плоскости между векторами  $\vec{H}$  и  $\vec{z}$ .

При наличии градиента магнитного поля на базовом расстоянии  $l$  возможны следующие варианты:

- 1) изменение величины полного вектора магнитной индукции  $\vec{T}$  на величину  $\Delta T$  без изменения его направления;
- 2) изменение угла магнитного наклона  $v$ ;

- 3) изменение направления вектора магнитной индукции  $\vec{T}$  в вертикальной плоскости, что приводит к изменению угла магнитного наклона  $v$  на величину  $\Delta v$ ;
- 4) изменение направления вектора магнитной индукции  $\vec{T}$  в горизонтальной плоскости.

При вертикальной ориентации корпуса (рис. 1) варианты 1 и 2 из вышеперечисленных случаев приводят к изменению вертикальной составляющей  $\vec{z}$  на величину  $\Delta z$ . При идентичности феррозондовых полуэлементов информативный сигнал с градиентометра определяется параметром  $\Delta t$ :

$$\Delta t = t_1 - t_2 = T \sin v - (T + \Delta T) \sin(v + \Delta v), \quad (1)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – информационные сигналы с феррозондовых датчиков  $F_1$  и  $F_2$  соответственно;  $T$  – величина вектора магнитной индукции;  $\Delta T$  – величина изменения вектора магнитной индукции;  $v$  – угол магнитного наклона;  $\Delta v$  – величина изменения угла магнитного наклона.

При анализе математических моделей градиентометрических систем в условиях геомагнитного поля с локальными возмущениями следует принять во внимание следующие допущения в отношении феррозондовых датчиков:

- 1) полуэлементы должны быть идентичны по своим характеристикам и располагаться на одной оси;
- 2) статические характеристики должны иметь линейный характер;
- 3) должен отсутствовать температурный дрейф.

Данная математическая модель градиентометра (1) получена для идеального случая в соответствии с принятыми допущениями. Причем, как показывает опыт, даже при идеальном ориентировании геометрической оси феррозондового датчика по оси симметрии корпуса преобразователя не всегда обеспечивается соосное расположение осей чувствительности феррозондов, что приводит к возникновению инструментальных погрешностей.

Одним из путей уменьшения погрешности является механическая регулировка осей чувствительности датчиков относительно вертикальной ориентации корпуса ИС. Но этот процесс очень трудоемкий,

требующий высокой квалификации оператора. Потому даже малые отклонения осей чувствительности феррозондовых датчиков от оси симметрии  $OZ$  могут привести к большим погрешностям, существенно превышающим их порог чувствительности.

Другим наиболее целесообразным и перспективным путем является устранение каких-либо регулировочных манипуляций оператора при жесткой фиксации феррозондовых датчиков на базовом расстоянии  $l$ . Данный метод основывается на синтезе обобщенных математических моделей ИС, в которых учитываются индивидуальные конструкционные особенности в виде констант, при обработке результатов измерений позволяющих алгоритмическим путем компенсировать погрешности измерений и обеспечить более высокие точностные показатели аппаратуры.

При получении обобщенных математических моделей следует определить последовательность отдельных плоских поворотов [2], основываясь на применении общепринятых приемов теории пространственной ориентации, поскольку сами датчики обладают диаграммой направленности и, соответственно, относятся к категории векторно-измерительных преобразователей.

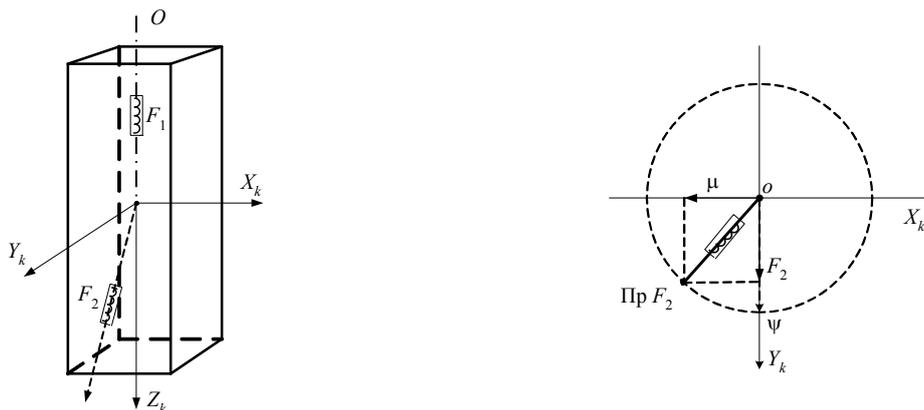


Рис. 2. Углы несоосного позиционирования феррозонда  $F_2$

При повороте корпуса вокруг оси  $OY$  на угол  $\mu$  вектор магнитной индукции в базисе будет иметь следующее представление:

$$\vec{T}_{R_2} = A_{\mu(y)} \vec{T}_{R_1} = A_{\mu(y)} A_{\alpha(z)} \vec{T}_R, \tag{3}$$

где  $A_{\mu(y)}$  – матрица направляющих косинусов плоского поворота базиса на угол  $\mu$  вокруг оси  $OY$ .

При повороте вокруг оси  $OX$  на угол  $\psi$  вектор магнитной индукции в базисе будет иметь следующее представление:

$$\vec{T}_{R_3} = A_{\psi(x)} \vec{T}_{R_2}, \tag{4}$$

где  $A_{\psi(x)}$  – матрица направляющих косинусов плоского поворота базиса на угол  $\psi$  вокруг оси  $OX$ .

Из уравнения (4) следует аналитическое выражение для информационного сигнала с феррозонда  $F_2$ :

Пространственные вариации корпуса градиентометрической измерительной системы, как правило, включают в себя ряд отдельных плоских поворотов базиса вокруг соответствующих осей на определенные углы. Первый поворот осуществляется вокруг оси  $OZ$  на угол  $\alpha$  (рис. 3). Векторно-матричное уравнение (ВМУ), соответствующее данному повороту, представляется следующим видом:

$$\vec{T}_{R_1} = A_{\alpha(z)} \vec{T}_R, \tag{2}$$

где  $A_{\alpha(z)}$  – матрица направляющих косинусов плоского поворота базиса  $R(O, X, Y, Z)$  на угол  $\alpha$  вокруг оси  $OZ$ .

Измеряемая проекция  $t_1$  не зависит от поворота в азимуте на угол  $\alpha$  при вращении вертикально ориентированного корпуса вокруг продольной оси, что вполне объяснимо с точки зрения физического смысла.

Далее предположим, что второй феррозонд  $F_2$  ориентирован в корпусе градиентометра не соосно с его продольной осью, причем здесь может иметь место отклонение оси чувствительности феррозонда  $F_2$  в двух взаимно перпендикулярных плоскостях на малые углы  $\mu$  и  $\psi$  (рис. 2).

$$t_2 = T [(\cos \psi \sin \mu) \cos v \cos \alpha + \sin \psi (\sin \alpha \cos v) + \cos \psi \cos \mu \sin v]. \tag{5}$$

Принимая во внимание (2) и (4), не сложно получить результирующее выражение для разностного сигнала  $\Delta t$  рассматриваемого варианта градиентометра:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = T \{ \sin v [1 - \cos \psi \cos \mu] - \cos v [\cos \psi \sin \mu \cos \alpha + \sin \psi \sin \alpha] \}. \tag{6}$$

Полученное выражение по сути своей представляет обобщенную математическую модель градиентометра с биеlementными феррозондовыми датчиками (для принятых изначальных условий), из которой следует как частное решение нулевой разностный сигнал  $\Delta t = 0$  при  $\mu = \psi = 0$ .

Анализ полученного выражения (6) показывает, что разностный сигнал  $\Delta t$  при нулевых значениях малых углов  $\mu$  и  $\psi$  функционально зависит от поворота корпуса вокруг продольной оси на угол  $\alpha$  в полном диапазоне ( $\alpha \in 0 \dots 360^\circ$ ), а также зависит и от величины магнитного наклона  $\nu$ .

Представляет вполне определенный интерес графическая интерпретация полученной функции аргумента  $\alpha$  при конкретных значениях  $\nu$ ,  $\mu$  и  $\psi$ .

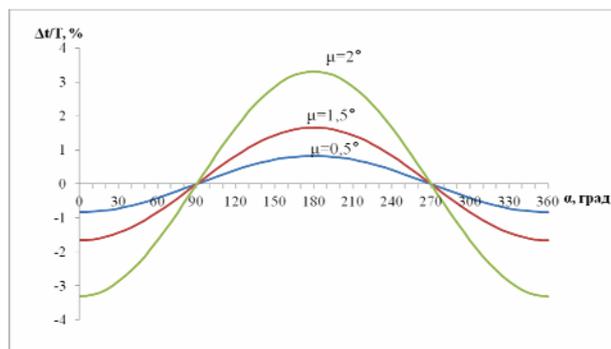


Рис. 3. Распределение  $\Delta t(\alpha)$  при  $\psi = 0^\circ$

На рис. 4 представлено изменение сигнала с феррозондового датчика с учетом изменения угла  $\psi$  от  $0,5$  до  $2^\circ$ . При этом максимальные значения сигнала совпадают со значениями, полученными при повороте на угол  $\mu$  и при  $\psi = 0,5^\circ$ ,  $\psi = 1^\circ$ ,  $\psi = 2^\circ$  будут, соответственно, равны  $0,83$ ,  $1,66$  и  $3,32$  %.

Погрешности имеют синусоидальный вид. Наибольшие значения погрешности по абсолютной величине принимают при следующих значениях угла  $\alpha$ :  $0$ ,  $180$ ,  $90$  и  $270^\circ$ . Представленные графики являются идентичными по величине, а также имеют фазовый сдвиг  $90^\circ$  по азимуту.

Таким образом, в рассматриваемом варианте градиентометра с биеlementными феррозондовыми датчиками можно говорить о том, что:

На рисунке 3 представлена зависимость изменения разностного сигнала на величину малого угла  $\mu$  при повороте феррозондового датчика вокруг продольной оси на угол  $\alpha$  в диапазоне от  $0$  до  $360^\circ$ , из которого видно, что при  $\mu = 0,5^\circ$  значение  $\Delta t / T$  будет равно  $0,83$  %, при значениях  $\mu = 1^\circ$  и  $\mu = 2^\circ$  полученные величины будут, соответственно, равны  $1,66$  % и  $3,32$  %.

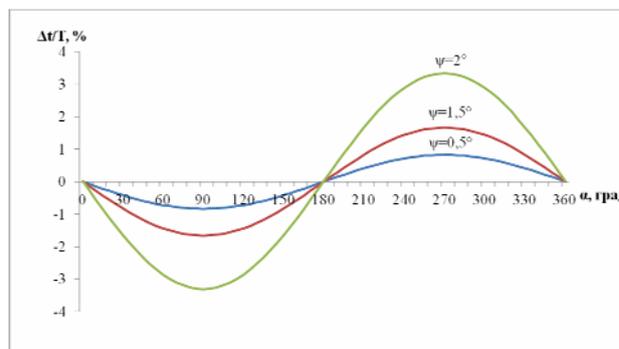


Рис. 4. Распределение  $\Delta t(\alpha)$  при  $\mu = 0^\circ$

1) при произвольном расположении феррозондовых датчиков в градиентном магнитном поле на величину разностного сигнала влияет как угол поворота  $\alpha$  вокруг оси  $OZ$ , так и изменение величины угла магнитного наклона  $\nu$ ;

2) при несоосном расположении феррозондовых датчиков, характеризуемом малыми углами  $\mu$  и  $\psi$  во взаимно перпендикулярных плоскостях, инструментальные погрешности градиентометра по каждому из параметров  $\mu$  и  $\psi$  по абсолютной величине имеют одинаковые предельные значения.

#### Библиографические ссылки

1. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. – Л. : Энергоатомиздат, 1986.
2. Ривкин С. С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. – М. : Наука, 1978. – 320 с.

*T. A. Redkina*, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*D. G. Milovzorov*, PhD in Engineering, Associate Professor, Ufa State Aviation Technical University

*R. R. Sadrutdinov*, JSC Scientific Production Company "Geofizika", Ufa

#### About Errors of Gradiometers with Bielement Ferroprobe Sensors

*The analytical solution of developing the gradiometers with bielement ferroprobe sensors is proposed in the article. Dependences of signal variation on the angle of ferroprobe sensors rotation are given and analysis of their errors is carried out.*

**Keywords:** gradiometer, bielement ferroprobe sensors, mathematical model.

Получено 02.06.14