

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКАХ И РАКЕТАХ

Н. В. Пушкин и С. Ш. Долгинов

Программой Международного геофизического года (МГГ) предусматривается проведение геомагнитных измерений на искусственных спутниках и ракетах, в результате которых должны быть получены экспериментальные данные о пространственном распределении магнитного поля Земли на больших высотах. В настоящей статье рассматриваются некоторые геофизические и технические аспекты такого рода измерений.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКАХ И РАКЕТАХ

а) Магнитное поле Земли и его особенности

Вокруг Земли имеется естественное магнитное поле, природа и происхождение которого остаются до сих пор не выясненными. Было предложено много теорий или, точнее, гипотез, пытающихся объяснить те или иные особенности магнитного поля Земли, но ни одна из них не может считаться вполне достоверной.

Магнитное поле Земли влияет на движение заряженных частиц, находящихся в верхних ионизированных слоях земной атмосферы, приходящих к нам от Солнца и из мирового пространства; это приводит к образованию таких геомагнитных эффектов, как поляризация радиоволны, отраженных от ионосферы, широтные эффекты в космических лучах и полярных сияниях, ориентировка лучей полярных сияний по силовым линиям магнитного поля и т. п.

Установлено также, что большие нерегулярные изменения в магнитном поле Земли, известные под названием магнитных бурь, отчетливо коррелируют с изменениями интенсивности космических лучей, высот и критических частот ионосферных слоев, появлением полярных сияний в низких широтах и некоторыми другими гелио- и геофизическими явлениями. Все это говорит о том, что действие магнитного поля Земли на заряженные частицы может сказываться на очень больших расстояниях от Земли.

Магнитное поле Земли разбивают на постоянное поле и на поле переменное. К постоянному полю относят также очень медленные, так называемые вековые изменения магнитного поля Земли; все остальные более быстрые изменения, как-то: магнитные бури, пульсации, суточные вариации и т. п. — относят к переменному полю. Распределение магнитного поля и его изменения во времени изучены пока только на поверхности земли и то в недостаточной мере. Сравнительно мало измерений проведено в полярных областях. Данные измерений на морях имеют пониженную точность.

Пользуясь данными наземных наблюдений, можно методом сферического гармонического анализа провести разделение постоянного и переменных полей на части, источники которых находятся внутри земли и вне ее. Многочисленные анализы постоянного поля, проведенные до настоящего времени, показывают, что большая часть его создается источниками, находящимися внутри земли, и только небольшая часть поля (около 1%) — источниками вне поверхности земли. В реальности внешней части постоянного поля имеется сомнение, поскольку ее величина лежит в пределах ошибок разложения при современных знаниях распределения поля.

Разделение полей суточных вариаций и магнитных бурь показывает, что большая часть их, примерно $\frac{2}{3}$, создается источниками вне поверхности земли и меньшая часть, примерно $\frac{1}{3}$, источниками внутри земли. Последними могут быть электрические токи, индуцируемые в проводящих слоях земли при изменении внешнего поля.

Внешняя часть поля суточных вариаций и магнитных бурь может быть также представлена в виде эквивалентной системы электрических токов, отнесенных к той или иной высоте. Задача определения места источников поля по заданному распределению его на поверхности является многозначной. Можно предложить много систем токов, дающих одинаковое распределение переменного поля на поверхности земли, и токов, индуцированных в земле. Поэтому на вычисленные эквивалентные системы токов, отнесенные к произвольной высоте, следует скорее смотреть как на удобный способ представления поля, чем как на физическую реальность.

Эквивалентные системы токов солнечно-суточных вариаций были впервые построены Бартельсом на основе данных анализа солнечно-суточных вариаций, проведенного Чепменом. Они были отнесены им к тонкому сферическому слою на высоте 100 км. Позднее системы токов суточных вариаций по данным наблюдений 2-го Международного полярного года были рассчитаны Беньковой¹. Идеализированные системы электрических токов магнитных возмущений, основанные на средних данных и отнесенные к высотам 100—150 км, были впервые построены Чепменом и уточнены им позднее совместно с Вестином. Из последних работ, связанных с расчетом токовых систем магнитных бурь, следует указать на работы Вестина² и Беньковой³. В них впервые приведены системы токов для отдельных магнитных бурь и возмущений.

Характерной особенностью токов магнитных бурь является большая концентрация их вдоль зоны максимальной частоты видимости полярных сияний. Они могут рассматриваться здесь как линейный или цилиндрический ток (струя электрического тока), включенный в токовый слой меньшей плотности. На вечерней стороне земли линейный ток течет к западу, на утренней — к востоку. Чепмен⁴ предполагает, что аномально большие значения суточных вариаций поля в области геомагнитного экватора могут быть вызваны линейным током, текущим здесь в дневное время с запада на восток. Величина поля, создаваемая таким током на расстоянии R от него, будет: $\Delta F = 0,2 \frac{I}{R}$, где ΔF выражается в гаммах,

I — сила тока в а и R — в км.

Открытие ионосферы и установление тесной связи между изменениями в магнитном поле Земли и в ионосфере сделали наиболее вероятным допущение, что суточные вариации и магнитные бури вызываются электрическими токами в ионосфере. В то же время некоторые исследователи не исключают возможность того, что конечная фаза бурь (эффекты после возмущения) обусловливается системой электрических токов в форме замкнутого кольца, окружающего землю в экваториальной плоскости на расстоянии нескольких земных радиусов от центра Земли⁵.

б) Проблемы, решаемые магнитными измерениями на ракетах и спутниках

Магнитные измерения на спутниках и ракетах могут обнаружить системы токов в ионосфере, оценить их плотность и дать заключения о существовании электрических токов вне ионосферы.

Магнитное поле системы токов может определиться как разность между измеренными значениями поля и вычисленными в предположении действия одного постоянного поля. Магнитным полем токов, индуцируемых в земле, при этих вычислениях пренебрегаем. Для вычисления постоянного поля на высотах можем воспользоваться эмпирической формулой, выражающей потенциал магнитного поля Земли рядом сферических функций:

$$V = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \{ g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda \} P_n^m(\cos \theta) \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1}, \quad (1)$$

где r , θ , λ — сферические координаты точки, a — средний радиус Земли, $P_n^m(\cos \theta)$ — присоединенные функции Шмидта, g_n^m и h_n^m — численные коэффициенты. Эти коэффициенты находятся так, чтобы компоненты поля, вычисленные по формуле (1) для $r = a$, соответствовали возможно лучшему наблюдаемому распределению поля на земной поверхности.

Вычисленные значения компонент поля северной — x , восточной — y и вертикальной — z на эпоху 1945 г. для высот 100, 300, 500, 1000 и 5000 км для сети точек через 10° по широте и 30° по долготе приведены в работе Вестина². При вычислении использовались ряды, имевшие 48 членов и содержащие сферические функции до 6-го порядка включительно.

Во многих случаях при вычислении поля на высотах ограничиваются только членами функции 1-го порядка. Потенциал поля функции 1-го порядка ($n=1$) будет:

$$V_1 = g_1^0 \cos \theta + g_1^1 \sin \theta \cos \lambda + h_1^1 \sin \theta \sin \lambda. \quad (2)$$

Потенциал поля однородно намагниченной сферы и поля центрального диполя имеет аналогичное выражение. Основываясь на этой формальной аналогии, считают поле трех членов функции 1-го порядка полем однородного намагничения земли.

Вычисленные значения компонент поля северной — x , восточной — y поля Земли. Ось однородного намагничения, проходящая через центр Земли, пересекает поверхность земли в геомагнитных полюсах. Северный геомагнитный полюс находился в 1945 г. по данным Афанасьевой⁶ в точке $\varphi = 79,4^\circ N$; $\lambda = 292,6^\circ E$ и по данным Вестина² в точке $\varphi = 78,6^\circ$; $\lambda = 289,9^\circ E$.

Иногда вместо центрального диполя, отнесеного к геометрическому центру земли, пользуются эксцентрическим диполем, отнесенными к так называемому магнитному центру земли. Северный полюс эксцентрического диполя находится в точке $\varphi = 80,1^\circ N$; $\lambda = 277,3^\circ E$.

Эксцентрический диполь несколько лучше соответствует распределению поля, наблюдаемому на поверхности земли. Поле функций высших порядков будет даваться разностью между наблюдаемым полем и полем однородного намагничения. Это «остаточное поле» имеет явно выраженный региональный характер и рассматривается как поле магнитных аномалий.

Из выражения (1) следует, что поля функций высших порядков должны убывать с удалением от земли значительно быстрее, чем поле однородного намагничения.

Учитывая это обстоятельство и небольшую величину остаточного поля, принимают поле земли на больших расстояниях от нее за поле однородного намагничения. Однако расчет геомагнитных эффектов с учетом только однородного намагничения приводит иногда к расхождению между теоретически вычисленными и реально наблюдаемыми эффектами. Так, в частности, уже давно было отмечено несовпадение области минимальных значений интенсивности космических лучей с геомагнитным экватором. Анализируя данные измерений интенсивности нейтронной и мезонной компонент космических лучей в области экватора, Симпсон^{7,8} указал, что лучшее согласие могло быть получено при смещении точки пересечения геомагнитного экватора и географического к западу на 45° и переносом северного полюса эксцентрического диполя в точку $\Phi = 80,2^\circ N$ и $\lambda = 246,8^\circ E$. Расхождение в положении геомагнитных полюсов, определенном из магнитных данных и данных об интенсивности космических лучей, указывает на необходимость учета влияния аномального поля и поля внеионосферного кольцевого тока⁹.

Магнитные измерения на спутниках и ракетах могут дать экспериментальные данные о затухании магнитных аномалий и других особенностей поля при удалении от земли. Эти данные могут быть использованы для проверки различных предположений о глубине источников региональных магнитных аномалий. Более точные сведения о глубине источников региональных аномалий будут иметь большое значение для изучения внутреннего строения земли. Сопоставление магнитных измерений на спутниках с определениями распределения масс внутри земли по наблюдениям за возмущениями орбиты спутника может быть использовано также для установления связи между гравитационными и магнитными аномалиями, создаваемыми неоднородным распределением масс на больших глубинах.

Из сказанного ясно, что данные магнитных измерений на спутниках и ракетах могут использоваться для решения ряда вопросов. На современной начальной стадии развития их, когда измеряется скалярная величина полного вектора напряженности поля, они могут использоваться главным образом для исследования общего распределения поля на больших высотах, обнаружения и оценки систем электрических токов солнечно-суточных вариаций и магнитных бурь. Мысль о возможности обнаружения токовых систем с помощью магнитных измерений на ракете была впервые высказана Вестином². Вестин указал, что при вертикальном пересечении токового слоя можно будет отметить его магнитометром по разрыву горизонтальных компонент магнитного поля токов на границах слоя.

Первое обнаружение токов в E -слое ионосферы было произведено Зингером и его сотрудниками^{10,11} вблизи геомагнитного экватора.

Было произведено два подъема до высоты 105 км. Один из них был проведен после полудня, когда на Земле наблюдались небольшие изменения в горизонтальной составляющей, и другой — через несколько дней в полдень. При первом подъеме наблюдалось обычное уменьшение поля с высотою, усложненное влиянием местной магнитной аномалии, имевшейся в районе запуска ракеты. Во время второго подъема на высотах 93—105 км был обнаружен скачок в изменении напряженности поля порядка 400 γ. Предполагается, что это изменение эквивалентно скачку в изменении горизонтальных компонент поля при прохождении через тонкий токовый слой $\Delta F = \Delta H = 0,4\pi I$, где ΔF — скачок в гаммах и I — интенсивность токов в амперах на километр. Наблюдавшийся при измерениях скачок в изменении поля соответствует тому, который мог бы ожидаться при прохождении магнитометра через токовую систему суточных

вариаций в области экватора. Величина его оказалась большей, чем ожидалось.

Возможность обнаружения токовых систем с помощью магнитных измерений на ракетах при прохождении ракеты через слой подробно рассмотрена в работе Чепмена¹², где рекомендуется следующая программа ракетных исследований:

- а) Исследование линейного тока, текущего вдоль зоны полярных сияний во время магнитных возмущений.
- б) Исследование ответвлений этого тока, могущих течь в дугах полярных сияний.
- в) Проверка гипотезы о возникновении во время магнитных бурь внеионосферного кольца токов в экваториальной плоскости.
- г) Исследование высоты, толщины и плотности токового слоя в полярной шапке.
- д) Исследования токов суточных вариаций в период магнитно-спокойных дней в низких и средних широтах.

Магнитные измерения на ракетах будут производиться во время МГГ в ряде стран в высоких и низких широтах. Ионосферные слои находятся на различных высотах в пределах от 90 до 300 км. Слой F2 ионосферы во время магнитных возмущений поднимается еще выше. Чтобы выяснить роль каждого из ионосферных слоев в создании токовых систем, необходимо хотя бы часть измерений провести на больших ракетах, могущих поднять магнитометры выше ионосферы.

Недостатком ракетных измерений является то, что они продолжаются очень короткое время и относятся к небольшой области в районе запуска ракет. Чтобы изучить пространственное распределение поля и его временные изменения, нужно произвести большое количество повторных измерений во многих пунктах, что связано с большими расходами. Поэтому можно думать, что магнитные измерения на ракетах будут проводиться только в наиболее интересных местах и в наиболее интересные моменты времени.

Наиболее интересными местами для измерения магнитного поля на ракетах могут быть зоны максимальной частоты видимости полярных сияний в Арктике и Антарктике с целью обнаружения и оценки интенсивности линейных токов, возникающих здесь во время магнитных возмущений. Наиболее подходящее время для запуска ракет может быть выбрано на основе прогнозов магнитных возмущений и данных видимой записи изменений магнитного поля в обсерваториях. МГГ приходится на годы максимума солнечной деятельности и, следовательно, является наиболее благоприятным периодом для обнаружения токовых систем суточных вариаций в умеренных широтах. Магнитные измерения на ракетах должны производиться здесь в летнее время, когда суточные вариации наибольшие.

в) Возможности, представляемые спутниками в исследовании магнитного поля Земли

Магнитные измерения на спутниках будут, по-видимому, менее точными, чем на ракетах. Меньшие размеры спутника не позволят отнести чувствительные элементы, воспринимающие поле, на большие расстояния от магнитных масс и других источников помех. Неориентированный спутник будет, кроме того, менее устойчивым, чем ракета. Значительно труднее будет также осуществить привязку измерений на спутнике к наземным измерениям. Большим преимуществом спутника будет то, что измерения на нем смогут проводиться в течение дол-

гого времени. Искусственные спутники могут быть использованы поэтому не только для исследования пространственного распределения, но и временных вариаций поля при многократных измерениях над одним и тем же местом.

Измерения магнитного поля на искусственных спутниках рассмотрены в^{13, 14, 15, 16}. Намечаются следующие задачи для этих измерений¹³:

- а) Исследование пространственного распределения постоянного магнитного поля вокруг Земли.
- б) Оценка пространственного распределения и высот систем электрических токов в ионосфере и за пределами ее.
- в) Исследование неоднородной структуры ионосферы.

Обнаружение и оценка токовых систем могут быть выполнены различными способами в зависимости от того, пересекает спутник токовый слой, движется над ним, под ним или в нем. Движение спутника в слое может быть установлено в случае неоднородного распределения ионизации в нем, в горизонтальном и вертикальном направлении. Наблюдения за ветрами в ионосфере указывают, что такое неоднородное распределение ионизации действительно имеет место. При наличии неоднородностей в ионосфере и связанных с этим локальных усилениях или ослаблениях токов в ионосфере сигнал магнитометра будет сильно флуктуирующим. Выделяя из этих флуктуаций более медленные флуктуации, вызванные неоднородностью в распределении постоянного поля, можно будет судить о размерах ионосферных неоднородностей и их интенсивности. За исключением времени подъема и падения, долгоживущий спутник может находиться в ионосфере только при движении его по эллиптической орбите, и то в перигее.

Магнитные вариации, создаваемые токами в ионосфере, будут измеряться с разным знаком на земле и выше ионосферы; это обстоятельство может быть использовано в качестве критерия для определения места линейных токов и токового слоя при движении спутника вне ионосферы. Поле кольцевого внеземного тока будет измеряться на спутнике повсюду с одним знаком.

Поскольку поле тока будет определяться по разностям между измеренными и вычисленными значениями поля, особое внимание должно быть обращено на точность определения положения спутника в момент измерения. Ошибка в определении высоты спутника в 1 км приводит к ошибке в определении поля 18—20 гамм. Такая же ошибка в положении спутника по широте приводит к ошибке в определении поля порядка 4 гамм. Наиболее точные значения постоянного поля на высотах, возможно, могут быть получены при осреднении повторных измерений на высотах в магнитно-спокойные дни.

С точки зрения исследования общего распределения магнитного поля и полярных токовых систем наиболее подходящей орбитой для спутника является орбита, проходящая через географические полюсы земли. При движении спутника вокруг Земли из-за ее вращения орбита спутника будет перемещаться к западу. Установленные на спутнике приборы будут производить при этом магнитную съемку Земли. Если спутник будет выброшен под некоторым углом к оси вращения Земли, то желательно, чтобы этот угол был не больше 10°, чтобы можно было провести измерения в области полюса однородного намагничения Земли.

Однако полярные орбиты и близкие к ним будут требовать значительно большего количества наземных станций, чем экваториальная орбита и близкие к ней. Экваториальная орбита может быть использована, однако, для решения меньшего количества задач, главным образом для

проверки гипотетического экваториального кольцевого тока вне ионосферы.

Для интерпретации результатов магнитных измерений на спутниках и ракетах очень важно иметь данные о полярных сияниях и об изменениях магнитного поля и ионосферы в возможно большем числе пунктов. МГГ представляет для этого наибольшие возможности. Большую ценность могут иметь такие одновременные наблюдения на спутниках за ультрафиолетовым и корпускулярным излучением солнца за пределами ионосферы.

Интерпретация магнитных измерений на спутниках будет связана с очень большой вычислительной работой, но зато может дать очень ценные результаты. Использование этих измерений значительно расширяется, когда удастся повысить их точность и от измерений скалярной величины напряженности поля перейти к измерению компонент поля. В частности, они могут быть тогда использованы для определения нормального поля и для более точного определения мест источников вековых изменений. Не исключено, что эти измерения приведут не только к уточнению современных представлений, но и к появлению новых идей и новых представлений.

МАГНИТОМЕТРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ НА СПУТНИКАХ И РАКЕТАХ

Наиболее ценные результаты при измерениях магнитного поля на спутниках и ракетах могли бы быть получены с помощью магнитометров, измеряющих компоненты поля или скалярную величину вектора поля и его направление. Возможность использования таких магнитометров появится в будущем. В ближайшее же время будут использоваться, по-видимому, магнитометры на основе ядерной индукции и с магнитно-насыщенными датчиками, измеряющими скалярную величину полной напряженности поля.

а) Протонный магнитометр
(магнитометр, основанный на измерении частоты свободной прецессии протонов)

Ядерно-индукционный метод измерения напряженности поля основан на использовании явления свободной прецессии протонов во внешнем магнитном поле. Частота прецессии протонов, обладающих магнитным и механическим моментом, определяется, как известно, соотношением Лармора $\omega = \gamma H$, где γ — гиromагнитное отношение и H — напряженность магнитного поля.

Пользуясь этим соотношением, можно, найдя частоту свободной прецессии протонов и зная гиromагнитное отношение, определить напряженность поля. Частота прецессии обычно измеряется в жидкостях, богатых протонами, гиromагнитное отношение которых известно наиболее точно: $\gamma_p = 2,67528 \pm 0,00006 \cdot 10^4 \text{ сек}^{-1} \text{ эрстед}^{-1}$.

В 1954 г. Паккард и Вариан^{17, 18} описали удобный способ наблюдения свободной прецессии протонов в слабом магнитном поле, позволяющий измерять это поле с высокой точностью. Способ этот заключается в следующем: на образец — жидкость с большим содержанием протонов, находящуюся в поле H_0 , — накладывают на короткое время сильное поле H (порядка 100 эрстед), которое потом быстро выключают. Поле H создается в катушке возбуждения, охватывающей образец и направленной примерно перпендикулярно к полю H_0 . Под действием поля H образец приобретает макроскопическую намагниченность, интенсивность которой будет равна $I_a = \chi_a H$, где χ_a — ядерная восприимчивость. После

выключения поля H возникающий в образце макроскопический магнитный момент начинает свободно прецессировать вокруг поля H_0 с частотой $\omega = \gamma_p H_0$. Величина макроскопического магнитного момента образца постепенно убывает, но время релаксации составляет около 3 сек. и достаточно для того, чтобы можно было замерить частоту напряжения, индуцируемого прецессирующим моментом образца в сигнальной катушке (она же катушка возбуждения), соединенной теперь с усилителем. Переменная электродвигущая сила, индуцируемая в катушке, будет $E = K \gamma_p H_0 H \sin^2 \theta e^{-t/T_2}$, где K — постоянная, зависящая от параметров катушки, коэффициента заполнения, добротности контура, θ — угол между полем H и H_0 , t — время с момента выключения поля H и T_2 — время релаксации.

Метод измерения поля на основе ядерной индукции обладает замечательными достоинствами по сравнению с другими методами: 1. Измерение поля сводится в нем к измерению частоты. 2. Точность измерения не зависит от конструктивных параметров датчика и каналов, формирующих сигнал. 3. Показания магнитометра даются в абсолютной мере. 4. Датчик и каналы, формирующие сигнал, принципиально свободны от сползания нуля. Точность измерения определяется только точностью эталона частоты. 5. Результаты измерения при неподвижном положении датчика не зависят от ориентации датчика в измеряемом поле. 6. Сигнал датчика, усиленный усилителем звуковой частоты, может быть передан по телеметрии и точно измерен на расстоянии (сигнал может быть непосредственно использован для модуляции передатчика). Точность измерений протонными магнитометрами в обсерватории оценивается в 1 гамму и ограничивается только точностью определений γ_p .

При использовании этого метода на подвижных объектах могут возникнуть некоторые осложнения, затрудняющие измерения и увеличивающие погрешность их: 1. Хотя частота прецессии и не зависит от ориентации катушки возбуждения по отношению к измеряемому полю, но сила сигнала будет пропорциональна $\sin^2 \theta$ и при малом θ будет близка к нулю. 2. При вращении катушки вместе с подвижным объектом с угловой скоростью Φ вокруг оси, перпендикулярной к оси катушки, поле будет измеряться с погрешностью $\Delta H = \pm 3,7 \Phi$, где H в гаммах, а Φ — в радианах в секунду¹⁹. 3. Неоднородность магнитного поля в объеме датчика магнитометра сильно уменьшает время релаксации T_2 . При больших градиентах поля измерить сигнал практически невозможно.

Протонный магнитометр может быть очень удобным для измерений на ракете, поскольку измерения ограничиваются сравнительно небольшим диапазоном изменений поля, а передача сигналов осуществляется в пределах прямой видимости. В случае измерений на спутниках бортовая аппаратура протонного магнитометра сильно усложняется.

1. Усилитель магнитометра должен будет обеспечивать достаточно большое соотношение сигнал/шум в диапазоне частот 1200—2800 гц.

2. При ограниченном числе наземных станций возникает необходимость в запоминающем устройстве и в бортовом генераторе эталонных меток, которые должны запоминаться вместе с сигналами магнитометра.

3. Спутник должен снабжаться тремя взаимно-перпендикулярными катушками и коммутирующим устройством для того, чтобы можно было измерить поле при любом положении и вращении спутника относительно поля¹⁵.

4. В непосредственной близости от катушек не должно быть источников посторонних магнитных полей с градиентами больших 5 гамм на 1 см.

б) Магнитометр полного вектора
самоориентирующегося типа

Первые измерения магнитного поля Земли на ракетах¹⁰ были выполнены трехкомпонентными магнитометрами с магнитно-насыщенными датчиками. Датчики жестко скреплялись с корпусом ракеты и снабжались квадратирующим устройством для получения скалярной величины полного вектора поля. Такая простая конструкция успешно работала благодаря тому, что датчики на ракете были в какой-то мере ориентированы, а диапазон измеряемых величин был сравнительно мал.

При измерениях поля на спутниках такая конструкция не может быть удовлетворительной. Для установки на спутнике необходим прибор полного вектора самоориентирующегося типа. Рациональность применения приборов этого типа на спутнике определяется, по крайней мере при первых опытных измерениях, следующими обстоятельствами:

1. Если бы удалось создать самоориентирующуюся магнитометр с магнитно-насыщенными датчиками малых габаритов, малого веса и малой потребляемой мощности, который имел бы высокую чувствительность и стабильность во времени, то такой магнитометр мог бы не только измерять скалярную величину магнитного поля, но и определять ориентацию спутника.

2. Магнитометры с магнитно-насыщенными датчиками менее чувствительны к неоднородности магнитного поля. Неоднородность поля влияет лишь на устойчивость и точность их работы, но не препятствует формированию сигнала.

3. Магнитометры с магнитно-насыщенными датчиками не будут создавать значительных помех для работы других приборов на спутнике, чего нельзя сказать о протонных магнитометрах.

Магнитометр полного вектора с магнитно-насыщенными датчиками состоит из трех основных частей: измерительного канала, механического узла ориентации и двух ориентирующих каналов. Измерительный и ориентирующий каналы содержат ряд аналогичных функциональных элементов: датчики, селективные усилители, фазочувствительные выпрямители. Эти элементы служат для преобразования сигнала постоянного магнитного поля земли в электрический сигнал постоянного тока достаточной мощности.

Магнитно-насыщенный датчик в простейшем случае состоит из пермаллоевой пластинки и нанесенных на нее первичной и вторичной обмоток. При намагничении пластинки полем $H = H_0 + H_m \sin \omega t$, где H_0 — измеряемое магнитное поле, а $H_m \sin \omega t$ — вспомогательное поле возбуждения, намагничающее сердечник датчика до насыщения, во вторичной обмотке возникает несинусоидальное напряжение, содержащее как четные, так и нечетные гармоники. Четные гармоники являются нечетной функцией измеряемого поля H_0 и четной функцией вспомогательного поля возбуждения. Нечетные гармоники, наоборот, зависят нечетным образом от фазы поля возбуждения и четным образом от знака постоянного поля H_0 .

В качестве чувствительных элементов целесообразно использовать датчики четных гармоник²⁰. Наибольшей стабильностью отличаются магнитометры, в которых используются не все четные гармоники, а только вторая. Схема датчика типа второй гармоники состоит из двух параллельно расположенных пермаллоевых пластинок, на которых нанесены две первичные обмотки, соединенные последователь-

но и включенные навстречу, и одна общая вторичная обмотка, охватывающая обе пластиинки. При таком способе включения нечетные гармоники компенсируются во вторичной обмотке, а четные складываются.

Сердечники датчиков изготавливаются в виде тонких полосок или проволочек. Коэффициенты размагничивания таких сердечников в поперечном направлении в тысячи раз больше, чем в продольном. Поэтому они практически намагничиваются проекцией поля на продольную ось датчика. По этой причине напряжение второй гармоники на обмотке датчика, установленного перпендикулярно к полю, равно нулю. При отклонении датчика в ту или другую сторону от направления, перпендикулярного к полю, на обмотке датчика возникает вторая гармоника соответствующей фазы, амплитуда которой в значительных пределах пропорциональна углу отклонения. Таким образом, датчики указанного типа обладают двумя важными свойствами: непосредственной чувствительностью к знаку измеряемого постоянного поля и избирательностью в отношении направления поля.

В магнитометрах полного вектора используются три взаимно перпендикулярных датчика, укрепленных на площадке узла ориентации. Датчик, установленный перпендикулярно к площадке, является измерительным, два других, лежащих в плоскости площадки, служат для установки ее перпендикулярно полному вектору поля. Питание датчиков осуществляется от специального генератора с частотой 2000 гц. Напряжение его свободно от содержания четных гармоник. Сигналы с каждого датчика усиливаются селективными усилителями, настроенными на частоту 4000 гц, после чего поступают на фазочувствительные выпрямители. Величина и знак постоянной составляющей выпрямленного тока каждого из трех фазочувствительных выпрямителей зависят от величины и знака магнитного поля, действующего на соответствующий датчик.

В дальнейшем схемы измерительного и ориентирующих каналов существенно отличаются. Выходные сигналы фазочувствительных выпрямителей ориентирующих каналов поступают на вход магнитных усилителей сервосистем ориентирующих каналов. В сервосистемах эти сигналы преобразуются в сигналы частоты 400 гц и усиливаются по мощности. Выходные клеммы сервосистем ориентирующих каналов подключены к управляющим обмоткам малоинерционных фазочувствительных моторов механического узла ориентации. Постоянные фазы малоинерционных моторовются от специального генератора 400 гц, от которого также поступает напряжение для возбуждения магнитных усилителей.

Таким образом, каналы, преобразующие сигнал магнитного поля в электрический сигнал, и сервосистема работают на разных частотах. Это повышает помехоустойчивость схемы. Сервосистема не содержит селективных элементов, и режим ее работы не зависит от изменения напряжения источников питания в широких пределах. Моторы сервосистемы врашают площадку с закрепленными датчиками через механическую передачу до тех пор, пока напряжение на их управляющих обмотках не станет равным нулю, что имеет место, когда датчик измерительного канала будет ориентирован по полному вектору.

При отклонении площадки от нормального к полному вектору направления на угол α на ориентирующих датчиках появляется сигнал рассогласования, пропорциональный $\sin \alpha$. Связанная с этим погрешность измерительного датчика будет пропорциональна $\sin^2 \alpha/2$. Следовательно, при ошибке в ориентации площадки в 1° погрешность измерительного

датчика не превосходит 4 гамм. Узел ориентации магнитометра спутника должен допускать любое число поворотов по обеим осям. Поэтому в нем должны быть скользящие токопроводы с надежными контактами.

На валах, идущих от моторов к площадке узла ориентации, могут быть укреплены подвижные контакты двух потенциометров, положение которых будет зависеть от ориентации корпуса спутника по отношению к земному магнитному полю. Положение подвижных контактов может передаваться по двум каналам телеметрии.

В измерительном канале магнитометра используется компенсационный метод измерения. Поле в пределах ± 2500 μ можно компенсировать автоматически введением глубокой отрицательной обратной связи. Изменения в этих пределах могут передаваться двумя каналами телеметрии. Остальная часть поля может компенсироваться током, поступающим в компенсационную обмотку от стабильного источника тока. Ток компенсации может изменяться автоматически, при отклонениях поля, больших ± 2500 μ от заданных уровней. Положение переключателя диапазонов должно передаваться пятым каналом телеметрии.

Если все блоки электроники этой весьма сложной системы будут выполнены на полупроводниковых элементах, то вес магнитометра вместе с узлом ориентации не превзойдет 12–13 кг. Потребляемая магнитометром мощность будет около 20 ватт. Очевидно, что такая схема возможна только в случае, когда температурный режим внутри спутника будет допускать использование полупроводниковых элементов. Ожидается, что температура спутника при малых внутренних источниках энергии может колебаться в пределах 0–10°C.

Однако даже в этом случае может возникнуть вопрос о стабильности нуль-пункта магнитометра. Анализ отдельных элементов схемы и экспериментальная проверка стабильности во времени нуль-пунктов аналогичных магнитометров, выполненных на германиевых триодах, диодах и магнитных усилителях, показывают, что уход нуля магнитометров при комнатных температурах не превосходит 60 гамм в сутки. В диапазоне температур 0–20° температурный коэффициент таких магнитометров может быть порядка 10 гамм на градус, что заметно превышает температурный коэффициент обычных магнитометров. Однако температуры внутри спутника могут измеряться и передаваться по телеметрии, и поправки за температурные измерения могут вноситься при обработке.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Бенькова, Труды НИИЗМ, сер. 6, вып. 1 (1941).
2. E. H. Vestine, L. Laporte, I. Lange and W. E. Scot, Carnegie Inst. of Wash. Pub. № 580 (1947).
3. Н. П. Бенькова, Труды НИИЗМ, вып. 10 (20) (1953).
4. S. Chapman, Archiv. f. Meteorol. geophys. u. Bioklimatol. 4, 368 (1951).
5. V. C. A. Ferrago, In International Association of geomagnetism and Aeronomy Bulletin № 15b, 166–186, Paris (1956).
6. Б. И. Афанасьев, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геоф. 11, № 1 (1947).
7. J. A. Simpson, K. B. Fenton, J. Katzman and D. S. Rose, Phys. Rev. 102, 1648–1652 (1956).
8. D. C. Rose, K. B. Fenton, J. Katzman and J. A. Simpson, Can. J. Phys. 34, 968–984 (1956).
9. Н. П. Бенькова, Труды Третьего совещания по вопросам космогонии, 78–90, изд. АН СССР (1954).
10. S. F. Singer, In «Rocket exploration of the upper atmosphere», London, Pergamon Press, 368–370 (1954).

11. S. F. Singer, et al., J. Geophys. Res. 55, 115—126 (1950); Phys. Rev. 82, 957 (1951).
 12. S. Chapman, In «Rocket exploration of the upper atmosphere», London, Pergamon Press, 292—305 (1954).
 13. E. H. Vestine, In «Scientific Uses of Earth Satellites». Ann Arbor: The University Michigan Press 198—214 (1956).
 14. S. F. Singer, In «Scientific Uses of Earth Satellites». Ann Arbor: The University Michigan Press, 215—233 (1956).
 15. J. P. Heppner, In «Scientific Uses of Earth Satellites». Ann Arbor: The University Michigan Press, 234—246 (1956).
 16. L. Katz, In «Scientific Uses of Earth Satellites». Ann Arbor: The University Michigan Press, 247—252 (1956).
 17. M. Packard and R. Varian, Phys. Rev. 93, 941 (1954).
 18. G. Watars and G. Phillips, Geophys. Prospecting 4, 1 (1956).
 19. J. Laurence, et al., J. Geophys. Res. 61, No. 3, 547 (1956).
 20. М. А. Розенблат, Магнитные усилители. Изд. Советское радио. Москва (1956).
-