



## ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ УСТАНОВКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВНЕШНЕЙ КАЛИБРОВКИ РСА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

**Л.М. Атрошенко**, кандидат физико-математических наук, директор подспутникового полигона "Скрипалі" ООО "ЛЕС-ИНФОРМ", г. Харьков

**А.Н. Горобец**, младший научный сотрудник Харьковского национального университета (ХНУ) имени В.Н. Каразина

**Н.Н. Горобец**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой ХНУ имени В.Н. Каразина, г. Харьков

**И.А. Мель**, директор метрологического учебно-издательского центра ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

**И.Г. Мындарь**, комендант подспутникового полигона "Скрипалі" ООО "ЛЕС-ИНФОРМ", г. Харьков



Л.М. Атрошенко



А.Н. Горобец



Н.Н. Горобец



И.А. Мель



И.Г. Мындарь

*Решены задачи размещения метрологических средств для наземного обеспечения внешней калибровки радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) в разных режимах обзора. Обоснованы принципы и точностные характеристики, а также приведен алгоритм построения картосхем размещения пассивных метрологических средств и решен ряд сопутствующих задач. Приведены конкретные схемы расстановки метрологических средств на зачетные сеансы летных испытаний РСА.*

*The issues of metrological instruments siting for ground support of external calibration of synthetic aperture radars (SAR) in different overview modes are solved. The principles and accuracy characteristics are grounded, as well as an algorithm of construction of schematic maps of passive metrological instruments siting is shown and a number of related tasks is solved. The specified schemes for the arrangement of metrological instruments for the qualification sessions of SAP flight tests are shown.*

### Введение

Успешность внешней калибровки радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны космического базирования не в последнюю очередь

зависит от точности расстановки метрологических средств [1]. В настоящей статье рассматриваются требования к точностным характеристикам пространственного расположения пассивных метрологических средств – радиолокационных отражателей (РЛО), используемых на калибровочных комплексах для наземного обеспечения оценки основных технических характеристик РСА и соответствующих им параметров радиолокационных изображений (РЛИ). Исходным, основополагающим требованием является следующее: расположение РЛО в пространстве должно обеспечивать уровень отклонения радиометрических характеристик РЛИ РЛО от заявленных значений эффективной площади рассеяния (ЭПР), используемых для процесса внешней калибровки РЛО, не превышающий уровня радиометрической разрешающей способности РСА.

Руководствуясь именно этим требованием, на практике в качестве пассивных метрологических средств используют преимущественно трехгранные угольковые отражатели с треугольными гранями (ТУО) как РЛО с наиболее пологой вокруг нуля диаграммой обратного рассеяния [2]: как показано методами геометрической оптики [3, 4] и методами электромагнитного моделирования [5],

при отклонении оси ТУО от направления зондирующего сигнала на  $\pm 10^\circ$  его ЭПР отклоняется от максимальных значений не более чем на 7 %. Точное знание формы диаграммы обратного рассеяния ТУО позволяет провести простые расчеты, которые показывают, что, например, при радиометрической разрешающей способности РСА, равной 0,2 дБ, ось ТУО не должна выходить за пределы телесного угла  $3^\circ$ . Для достижения искомого результата надо знать навигационные характеристики космического аппарата (КА) – носителя РСА, определяющие азимут следа траектории его движения, характеристики радиолокационного обзора и иметь соответствующей точности угломерный и навигационный инструмент и устойчивые навыки его использования для получения точностей не хуже паспортных. Для определения характеристик расстановки метрологических средств на базе среды Borland C++ разработано автоматическое рабочее место (АРМ) оператора, позволяющее в течение нескольких минут после получения исходных данных съемки иметь все необходимые данные. Интерфейс АРМ приведен на рис. 1.

#### Установка метрологических средств по азимуту и углу места

Решение задачи определения истинного азимута следа трассы не представляет никакого труда, поскольку она давно и многократно решена различными авторами в разных приближениях и для разных типов орбит [6]. В нашем же случае эта задача служила базовой для создания АРМ, позволяющего оперативно рассчитать полную схему расстановки метрологических средств для оценки

основных характеристик РСА и соответствующих характеристик РЛИ.

Для создания АРМ задача вычисления истинного азимута следа трассы КА решалась нами в авиационном приближении (в силу чрезвычайно малой зависимости значений вычисляемой величины от отклонений местной вертикали от радиуса – вектора КА – центр Земли: они составляют, как показали расчеты, не более  $0,002^\circ$ ), начало координат для простоты было привязано к КА. В итоге формула, используемая нами при расчетах азимута следа трассы  $A$  для случая квазигеоцентрической квазиполярной орбиты [6], имеет вид

$$A = \pm \arcsin\left(\frac{\sin \gamma |\vec{a}|}{|\vec{s}|}\right),$$

где  $\gamma$  – наклонение орбиты;  $|\vec{a}|$  и  $|\vec{s}|$  – векторы скорости КА и движения его вдоль проекции трассы.

После вычисления истинного азимута следа трассы КА истинный азимут оси ТУО получается в зависимости от направления ветви орбиты (восходящий/нисходящий полувиток) и направления обзора (левым/правым бортом), данные о которых получаются в качестве исходных из центра управления полетами и вводятся в АРМ наряду с высотой и наклонением орбиты КА и широтой полигона. Ясно, что азимут ориентации осей метрологических средств всегда отличается от азимута следа трассы на  $90^\circ$ . В случае, если съемка планируется на восходящем витке в режиме правого обзора или на нисходящем полувитке в режиме левого обзора, ТУО ориентируются на  $A-90^\circ$ . Если же съемка

Рис. 1. Интерфейс АРМ для расчета схемы расстановки метрологических средств



Рис. 2. Общий вид ТУО в рабочем положении

проводится на нисходящей ветви в режиме правого обзора или на восходящей ветви в режиме левого обзора, то ТУО ориентируются на  $A+90^\circ$ .

Что же касается угла места оси ТУО, то очевидно, что он определяется как  $(\pi/2-\alpha)$ , где  $\alpha$  – угол обзора. Однако проконтролировать точность установления угла места самой оси не представляется возможным. Поэтому ТУО устанавливаются таким образом, чтобы вершина правильного треугольника его раскрытия была вверху, а гипотенуза нижней грани была строго горизонтальна (рис. 2). Тогда положение оси определяется точной установкой угла наклона нижней грани ТУО под углом  $(\pi/2-\alpha-\beta)$ , где  $\beta$  – угол между нижней гранью и осью рефлектора ( $35,26^\circ$ ). Для точной установки ТУО по азимуту отражатель устанавливается таким образом, чтобы горизонтальная проекция высоты его нижней грани строго (ошибка не более  $0,1^\circ$ ) совпадала со средней линией основания опоры ТУО, для чего предусматривается дополнительная фиксация положения ТУО относительно опоры специальными радиопрозрачными растяжками. Они же служат для

предотвращения изменения азимута оси ТУО под влиянием ветровых нагрузок.

Как известно, эквивалентная апертура ТУО с треугольными гранями, определяющая  $\text{ЭПР}_{\max}$  ТУО, равную  $4\pi l^4 / 3\lambda^2$  ( $l$  – длина внутренней стороны ребра ТУО), имеет форму правильного шестиугольника [4] (рис. 3). Как видим, ЭПР определяется квадратом площади апертуры. Отклонение оси ТУО от направления зондирующей волны ведет к искажению формы (и соответственно уменьшению площади) эквивалентной апертуры, то есть к уменьшению получаемого на РЛИ значения ЭПР ТУО по сравнению с ее истинным максимальным значением.

Проведенные на основании приведенной оптической модели простые геометрические расчеты показывают, что для получения необходимой точности отображения номинального ЭПР ТУО на РЛИ (для примера мы взяли точность  $0,2$  дБ) для ТУО с  $\text{ЭПР}_{\max}$  порядка десятков децибелов необходима точность установки ТУО по азимуту и углу места не хуже  $2^\circ$ , а для ТУО с  $\text{ЭПР}_{\max}$ , равным и меньше нуля, – не хуже  $0,5^\circ$ . В то же время следует отметить, что на практике чем меньше ТУО, тем сложнее (в силу особенностей угломерного инструмента) выдерживать точность его установки.

Исследование влияния неточностей юстировки ТУО показало, что отклонение оси ТУО от направления на КА в пределах телесного угла  $3^\circ$  не имеет существенного влияния на отображение значений ЭПР трехгранного уголкового отражателя в заданных пределах ( $0,2$  дБ). График зависимости уменьшения полученных на РЛИ значений ЭПР по сравнению с истинными от неточности юстировки ТУО приведен на рис. 4.

В силу вышеизложенного, предъявляются весьма жесткие требования к используемым средствам измерительной техники (СИТ) и квалификации персонала, поскольку точность установки метрологических средств, равно как и достоверность последующих результатов внешней калибровки, зависят

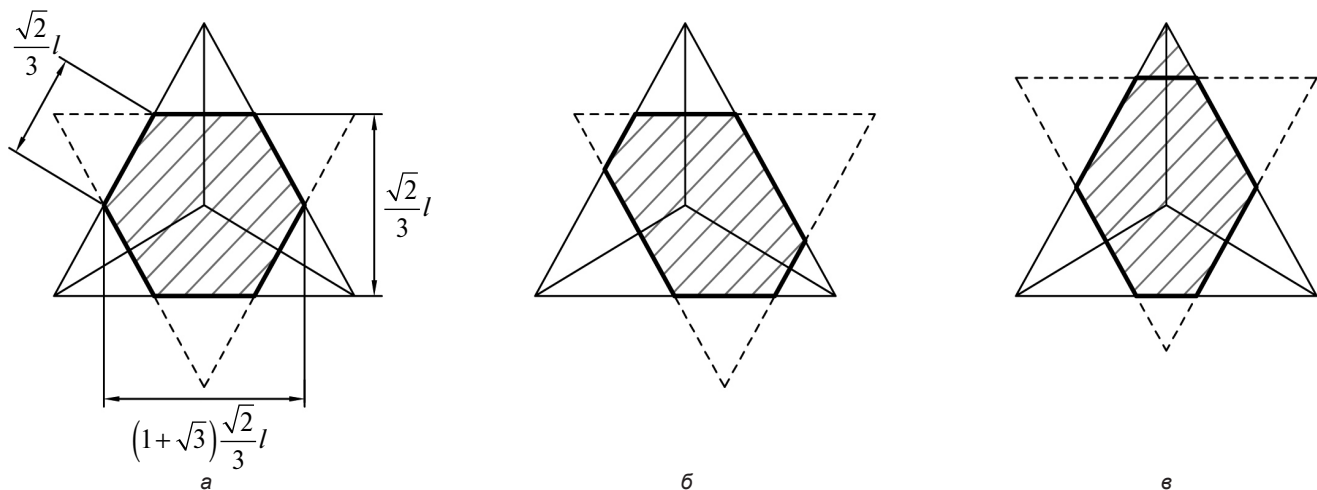


Рис. 3. Эквивалентные апертуры ТУО: а – в направлении максимума; б – при смещении угла облучения в горизонтальной плоскости; в – при смещении угла облучения в вертикальной плоскости

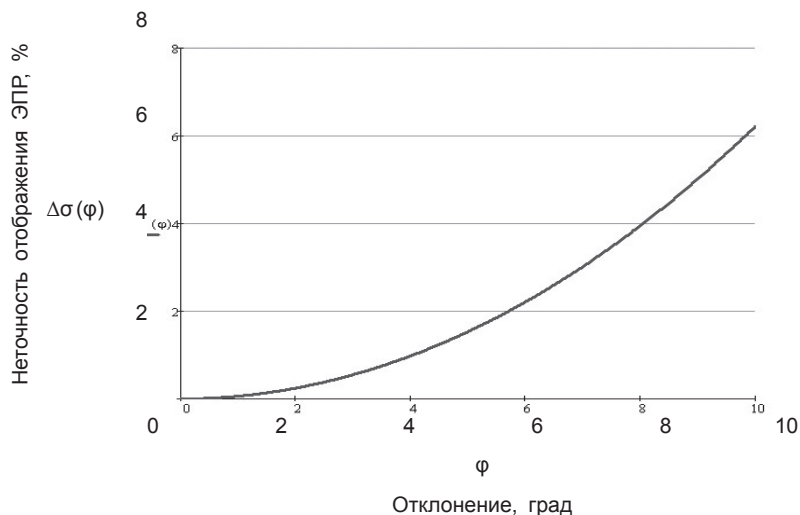


Рис. 4. Уменьшение полученных на РЛИ значений ЭПР ТУО в зависимости от отклонения оси

как от правильности выбора СИТ, так и от точности соблюдения требований методики их использования.

Нами в качестве навигационного инструмента использовались перископические ПАБ – 2АМ, обеспечивающие точность установки азимута не хуже 0,1°, угломерного – лазерные уровни Laserliner DigiLevel Compact, обеспечивающие при надлежащем употреблении такую же точность. Персонал полигона соответствующим образом обучен и сертифицирован КОOMET.

### Расстановка метрологических средств

Как было описано ранее [1], схема расстановки создается с учетом особенностей синтезирования антенны РСА, для чего в исходные данные АРМ закладываются, кроме основных, данные о ширине канала синтезирования. Для удобства последующей работы на рабочее поле наносится условная сетка каналов синтезирования и каналов линейно-частотной модуляции, затем ТУО “расставляются” на схеме по принципу непопадания ни одной пары

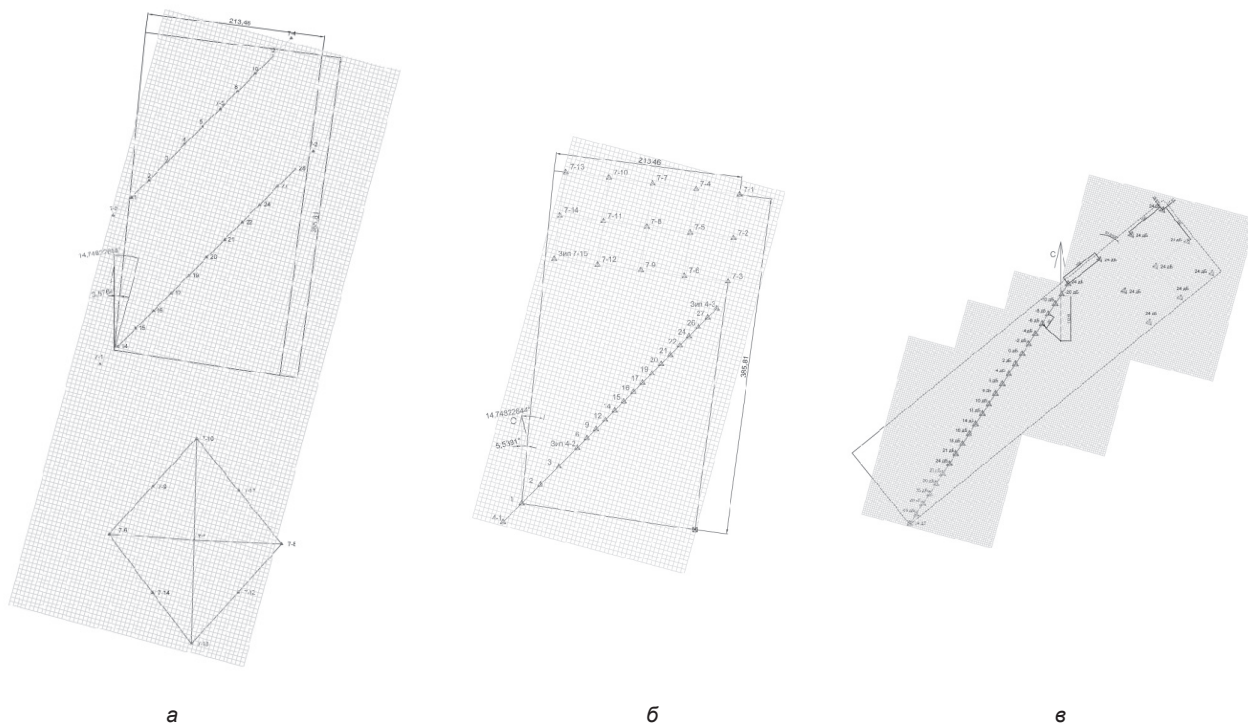


Рис. 5. Реализованные схемы расстановки метрологических средств на ККК в Харьковской (субмеридиональный ККК) и Волгоградской (субпараллельный ККК) областях: а – последовательная расстановка мир с двухлинейной радиометрической мирой; б – последовательная расстановка мир с расширенной мирой разрешающей способности; в – параллельная расстановка мир



Рис. 6. Схема расстановки метрологических средств на ККК в Волгоградской области на подложке оптического космического снимка 06.11.2013 г.

отражателей в один и тот же канал. При такой “расстановке” автоматически получается массив данных координат ТУО, сопряженный с их ЭПР<sub>max</sub> и паспортными номерами.

На рис. 5 приведены примеры успешно реализованных в ходе выполнения радиолокационных съемок контрольно-калибровочных комплексов (ККК) схем расстановки метрологических средств в Харьковской и Волгоградской областях.

Как видим, способы расстановки и требования к ее точности диктуются не только составом мир, но

и расположением ККК относительно сторон света. Так, при расположении ККК в субмеридиональном направлении (фактически параллельно трассе КА) миры расставляются в последовательном порядке, что требует особенно тщательного соблюдения (до 0,1 м) точности их расстановки, в то время как при субпараллельном расположении ККК параллельная расстановка мир позволяет отклонение от рассчитанных координат ТУО до 2 м.

Реализованная схема расстановки на подложке оптического космического снимка 06.11.2013 г. представлена на рис. 6, где стрелкой отмечен знак Государственной геодезической сети и центральный маркер ККК.

Непосредственно расстановка производится при необходимости сверхточной (до 0,1 м) расстановки с использованием высокоточного GPS-приемника (в нашем случае – приемник типа Leica-2), при менее высоких требованиях (случай субпараллельного расположения ККК) – с помощью навигационных приборов.

В последнем случае, однако, необходимо учитывать магнитное наклонение (угол, на который отклоняется стрелка под действием магнитного поля Земли в вертикальной плоскости) и магнитное склонение в месте расположения ККК. Даже если магнитное наклонение, измеренное с помощью инклинометра, точно известно, минимизация его влияния на точность установки метрологических средств фактически полностью зависит от навыков оператора. Что же касается магнитного склонения, то в каждый отдельный момент времени точно определить его не удастся: магнитные по-

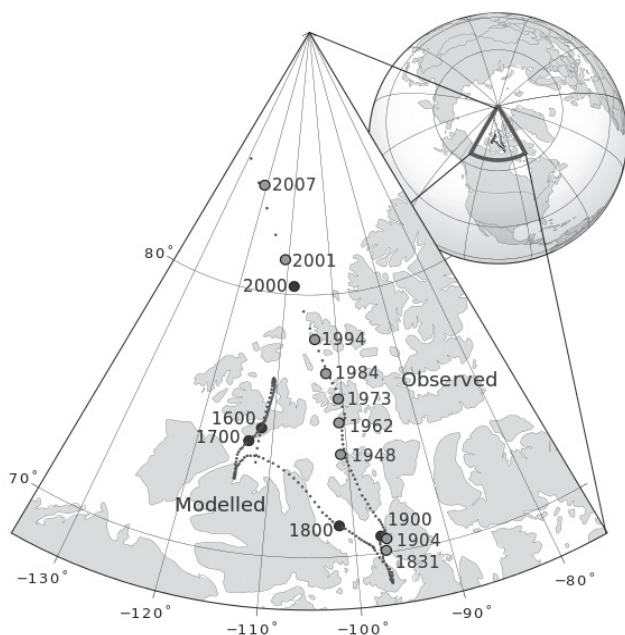


Рис. 7. Перемещение северного магнитного полюса Земли с начала XVII века

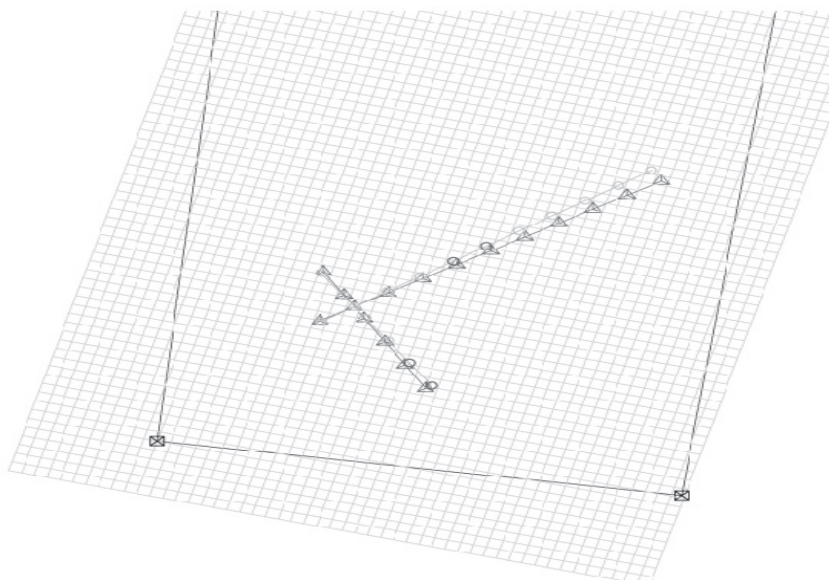


Рис. 8. Различия в расстановке метрологических средств, вызванные ошибкой в используемых значениях магнитного склонения

люса Земли интенсивно мигрируют (см. рис. 7 [7]), вследствие чего (и не только) магнитное склонение на местности непрерывно меняется. Причем протекает это явление неравномерно и рассчитать это изменение не представляется возможным. Так, например, за 6 месяцев 2013 г. северный магнитный полюс Земли сместился почти на 260 км, в то время как за предыдущие сто лет – на 2414 км.

Использование средних за некоторый период значений или значений, приводимых в [8] для работников сферы аэронавигации, значительно упрощает решение вопроса, но не настолько, чтобы ими было возможно достаточно продуктивно пользоваться при последовательной расстановке мир.

В качестве примера приведем (рис. 8) результаты расстановки метрологических средств с точным учетом магнитного склонения (путем использования GPS) и без такового (с использованием навигационных приборов, но с неточными данными магнитного склонения). Как видим, такая ошибка приводит к попаданию нескольких ТУО в один канал синтезирования (что может привести к интерференции отраженных от них радиолокационных сигналов).

Особо следует подчеркнуть, что использование неверных значений магнитного склонения при установке ТУО по азимуту может привести к значительным осложнениям достоверной оценки характеристик РСА, в особенности радиометрических. По этой причине нами применяются специально разработанные и метрологически аттестованные шаблоны для установки опоры ТУО, а следовательно, и оси ТУО с высокой точностью по азимуту.

#### Выводы

Таким образом, казалось бы простая процедура установки метрологических средств с использованием уже готовых данных расчетов, проведенных

с учетом всех исходных данных с применением разработанного АРМ, тем не менее, оказывается весьма отягощенной необходимостью уже на местности учитывать и купировать влияние многих приводящих факторов. Разработанная технология наземного сопровождения процесса оценки и контроля основных характеристик РСА космического базирования и параметров, получаемых с их использованием РЛИ, использование адекватных задаче СИТ и высокая квалификация персонала обеспечивают высокую достоверность полученных в ходе исследований результатов.

#### Список литературы

1. Требования, предъявляемые к контрольно-калибровочным комплексам для наземного обеспечения CalVal РСА космического базирования / Л.М. Атрошенко, А.Н. Горобец, Н.Н. Горобец [и др.] // Украинський метрологічний журнал. – 2013. – № 3. – С. 46–52.
2. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
3. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели / В.О. Кобак. – М.: Сов. радио, 1975. – 248 с.
4. Шукин А.Н. Угловые отражатели / А.Н. Шукин // Бюро новой техники. – М., 1949. – 58 с.
5. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – М.: Сов. радио, 1970. – 214 с.
6. Гонин Б.Г. Космические съемки земли / Б.Г. Гонин. – Л.: Недра, 1989. – 252 с.
7. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://earth-chronicles.ru/news/2013-06-04-44927>
8. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#declination>