

тел.: +7(495)504-1359  
факс: +7(495)504-1359  
119049, г.Москва  
ул. Мытная, 28/1

**GEO**TECHNOLOGIES

# Комплекс ЕМ-4Н

## Техническое описание

Зао «Геотехнологии»  
15 мая 2008г.  
[gp.gtcomp.ru](http://gp.gtcomp.ru)  
[gp@gtcomp.ru](mailto:gp@gtcomp.ru)

## Комплекс EM-4H

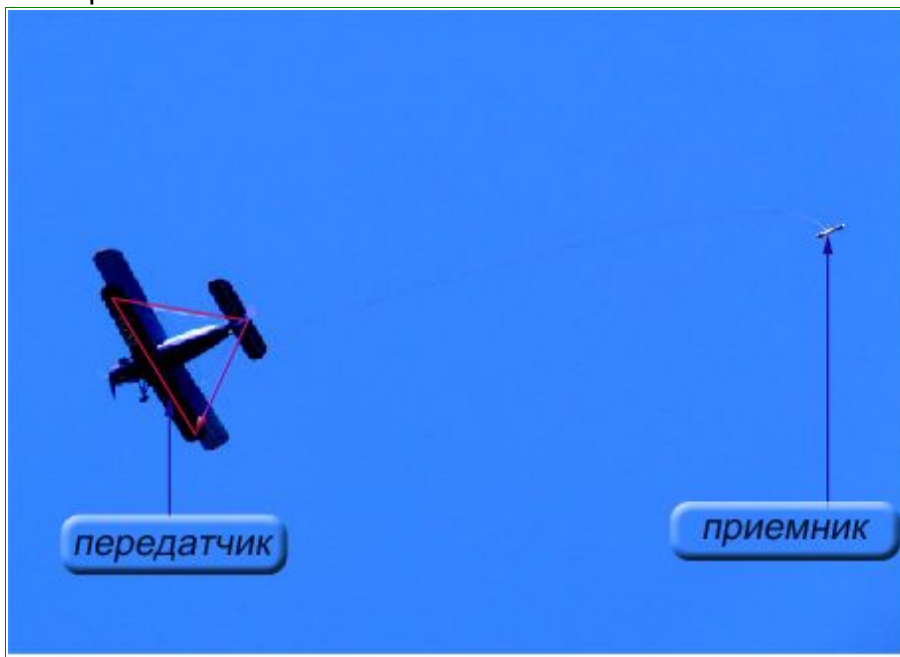
### Техническое описание

## Оглавление

1. Назначение и основные параметры.....	3
2. Состав комплекса .....	5
2.1 Передатчик.....	5
2.2 Приемник.....	6
2.3 Трос-кабель.....	6
2.4 Диполи передатчика.....	7
3. Принцип измерений .....	8
3.1 Обработка сигналов.....	8
3.2 Метод компенсации.....	9
3.3 Бортовая программа и наблюдаемые параметры.....	9
4. Порядок работы .....	11
4.1 Подготовка и монтаж аппаратуры.....	11
4.2. Включение и проверка.....	11
4.3. Запуск и настройка.....	11
4.4 Компенсация.....	12
5. Обработка данных.....	14
5.1 Программа UNGEN.....	14
5.2 Программа UGOL.....	15
5.3 Общие замечания к дальнейшей интерпретационной обработке.....	17
6. Вычисление параметров эллипса поляризации.....	18

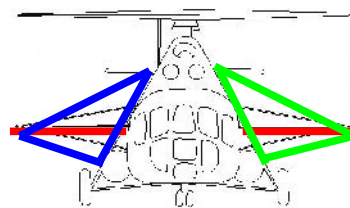
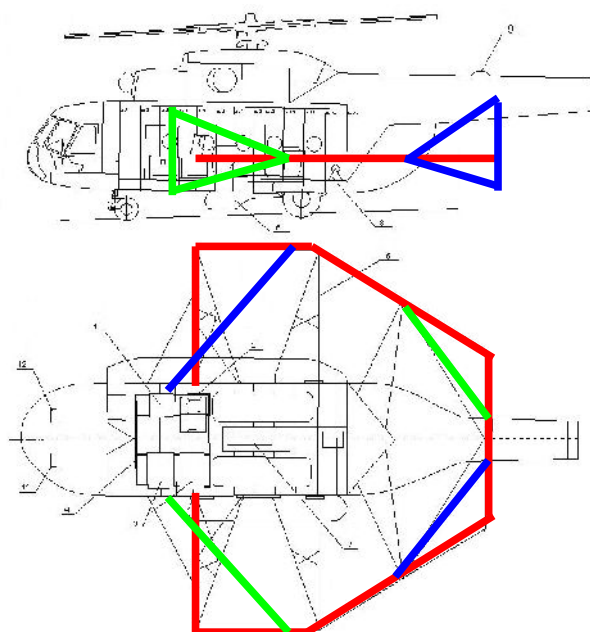
## 1. Назначение и основные параметры

Комплекс электрической разведки EM-4H предназначен для проведения аэросъемочных работ в целях изучения проводящих свойств пород. Система использует возбуждение на четырех частотах: 130, 520, 2080 и 8320 Гц. Она реализует частотный метод индуктивной электроразведки (модификация метода дипольного индуктивного профилирования) в варианте, когда возбуждающий диполь для каждой из частот преимущественно вертикален и жестко связан с летательным аппаратом – самолетом или вертолетом, а приемные рамки, измеряющие все три пространственные компоненты поля, смонтированы в буксируемой гондole. Форма возбуждающих сигналов на каждой из зондирующих частот – синусоидальная. Длина гибкого буксировочного троса-кабеля составляет 70 метров.



Измеряемые системой параметры передаются для регистрации бортовой ЭВМ (RS232). Для полноценной интерпретации данных, полученных при работе комплекса, должны быть также зарегистрированы дополнительные навигационные параметры: географические координаты, определяемые приемником спутниковой навигационной системы, а также значение высоты над рельефом, регистрируемое бортовым радиовысотомером.

Чтобы при обработке данных исключить влияние на процесс измерения проводящих свойств летательного аппарата-носителя на его борту возбуждаются и измеряются параметры дополнительных компенсирующих сигналов. Возбуждение этих сигналов осуществляется с помощью дополнительных диполей. Сигналы являются гармоническими и имеют частоты 667 и 833 Гц, их дипольные моменты, как и дипольные моменты основных зондирующих частот, жестко связаны с летательным аппаратом, однако расположены в горизонтальной плоскости. Для самолета это может быть один диполь на частоте 667 Гц, направленный вдоль строительной оси. Для вертолета – это два разнонаправленных диполя. Поскольку идея компенсации подразумевает совмещение центров всех возбуждаемых диполей, в вертолетном варианте каждый компенсатор образуется парой соленоидальных петель.



Идея компенсации поляризации носителя основывается на том, что поле компенсирующего диполя в пространстве распространяется по тем же законам, что и паразитное поле, обусловленное наведенными в корпусе летательного аппарата токами. Амплитуды сигналов компенсирующих диполей существенно меньше, чем амплитуды по основным частотам, и при интерпретации сигнал отклика на частотах 667 и 833 Гц не используется.

Пиковые значения амплитуд сигналов возбуждения различаются в вертолетном и самолетном вариантах. Для вертолета они составляют 18000 Ам<sup>2</sup> для частоты 130 Гц, 7200 Ам<sup>2</sup> для 520 Гц, 3000 Ам<sup>2</sup> для 2080 Гц и 1500 Ам<sup>2</sup> для 8320 Гц. Для компенсирующих частот амплитуда составляет около 2000 Ам<sup>2</sup>. В самолетном варианте амплитуды несколько меньше.

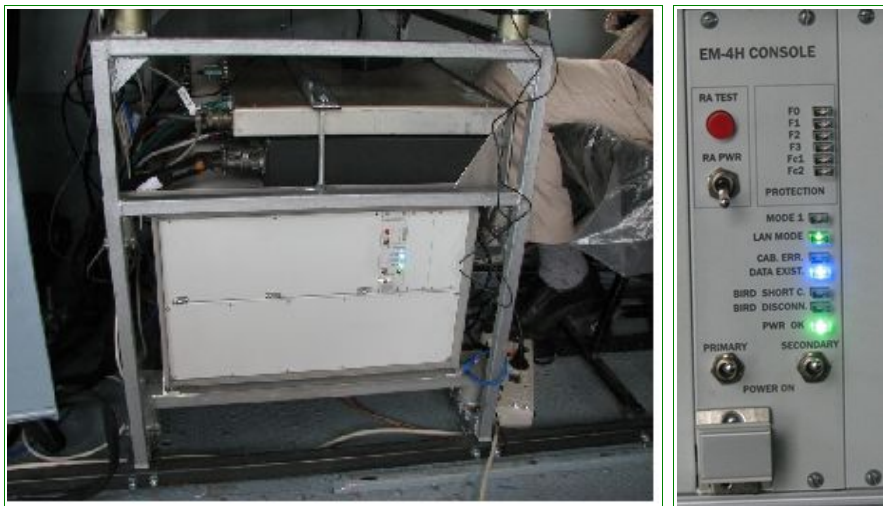
Выходными параметрами системы являются квадратурные компоненты поля для каждой из трех осей чувствительности приемных рамок и для каждой из четырех рабочих частот.

## 2. Состав комплекса

Ниже перечислены основные компоненты комплекса электрической разведки EM-4H.

### 2.1 Передатчик

Передатчик представляет собой электронный блок размером 570x440x200 мм весом не более 40 кг. Этот блок осуществляет управление питанием комплекса, управление сигналами возбуждения и их измерение, синхронную регистрацию данных, полученных по тросу-кабелю от блока приемника, взаимодействие с бортовой ЭВМ.



На задней стенке блока расположены разъемы:

- 19V 3A – разъем для подключения питания ноутбука;
- BIRD – разъем для подключения троса-кабеля;
- COM1,2 – разъем для подключения к системе сбора данных, RS232;
- MAIN COIL – разъем для подключения петли основного диполя;
- COM3,4 – технологический резервный разъем;
- LAN – технологический резервный разъем;
- RA – разъем подключения радиовысотомера (типа TRA3000 или TRA3500)
- COMP COIL – разъем для подключения петель компенсирующих диполей;
- POWER IN 28V – разъем для подключения всей системы к бортсети.

На передней панели блока расположены: три тумблера: PRIM. POWER, SEC. POWER, RA POWER, кнопка RA TEST, а также индикаторы.

- тумблер PRIMARY POWER, включает питание на силовую часть генератора.
- тумблер SECONDARY POWER, включает оба стабилизатора питания.
- тумблер RA POWER, включает питание радиовысотомера
- кнопка RA TEST, подает команду включения тестового режима радиовысотомера
- светодиод PWR OK, горит зеленым в нормальном режиме, и гаснет если входное напряжение питания ниже нормы или в случае внутренних неполадок.
- светодиод BIRD SHORT C, загорается в случае повышения потребляемого гондолой тока выше номинального
- светодиод BIRD DISCONNECT, загорается в случае понижения потребляемого гондолой тока ниже номинального
- светодиод DATA EXIST, горит при наличии данных от гондолы, даже эпизодических
- светодиод CAB. ERR, мигает красным при возникновении ошибок в магистрали, горит непрерывно при большом их количестве.



- Светодиоды PROTECTION F3, F2, F1, F0.1, F0.2, FC1, FC2 – индикаторы срабатывания защиты ключей; загораются при срабатывании защиты ключа соответствующей частоты, F3 – 8320 Гц, F2 – 2080 Гц, F1 – 512 Гц, F0.1 и F0.2 – два ключа частоты 130 Гц, FC1 – ключ частоты 667 Гц компенсатора, FC2 – ключ частоты 833 Гц компенсатора.

## 2.2 Приемник

Приемник состоит из двух частей: блока приемных рамок и блока электроники, соединяющихся между собой. Обе части располагаются в гондоле.

Приемные рамки помещаются в амортизированный демпфирующий подвес с целью уменьшения степени влияния механических возмущений корпуса гондолы на колебания приемных рамок в магнитном поле земли.

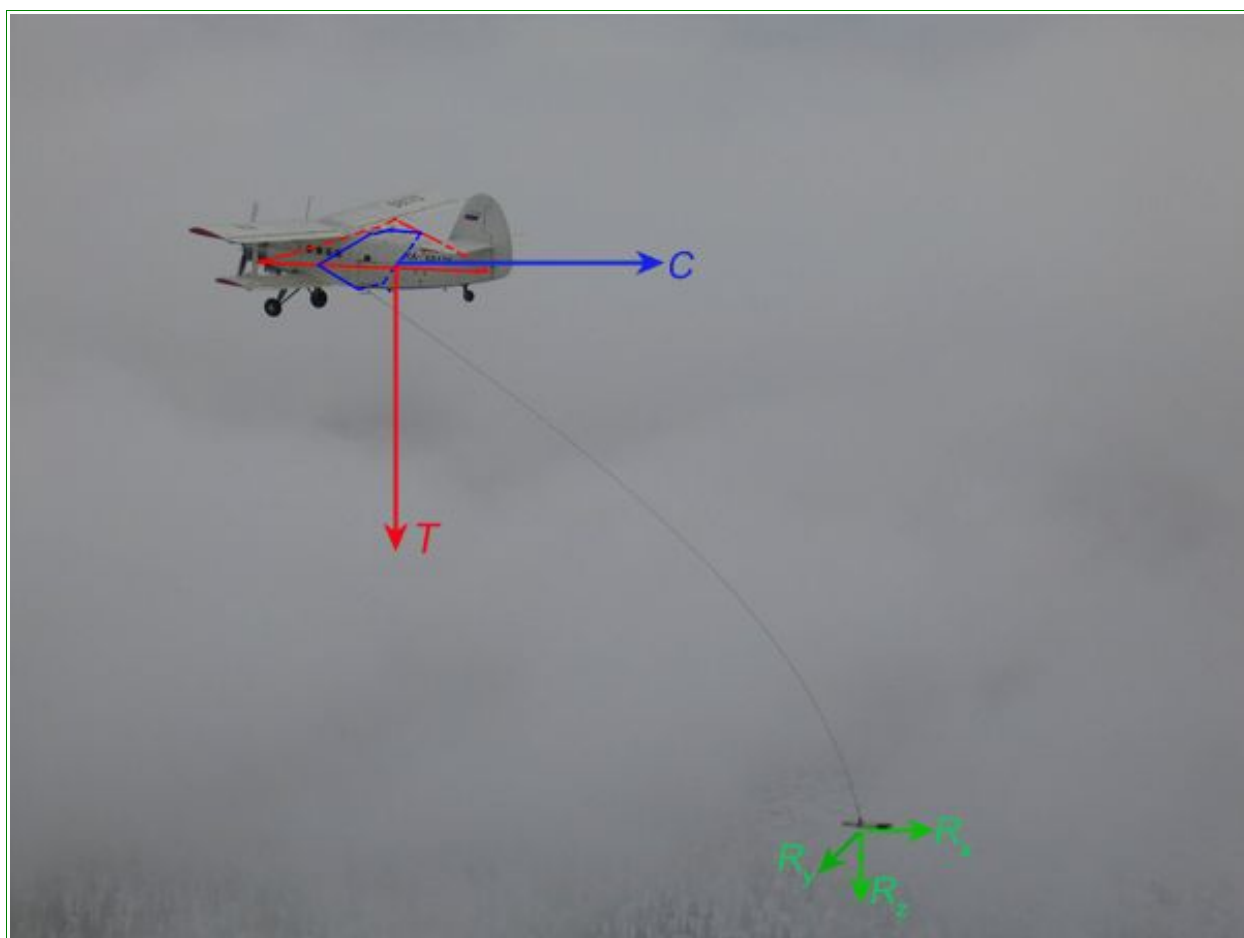


Блок электроники приемника осуществляет измерение сигналов приемных рамок и передачу цифровой информации по тросу-кабелю.

## 2.3 Трос-кабель

Трос-кабель представляет собой две или более экранированных витых пары с несущим кевларом и с внешней страховкой. Его длины должно быть достаточно для выпуска гондолы на 70 м. Одна из витых пар служит для подключения приемника EM-4H, а вторая может быть использована для подключения датчика квантового магнитометра, помещенного в гондолу.

## 2.4 Диполи передатчика



Излучающие диполи антенной системы передатчика представляют собой воздушные катушки (петли). В варианте установки системы на самолет Ан-2 (Ан-3) основной диполь передатчика состоит из 26 витков и монтируется, как показано на рисунке красным цветом (диполь Т). Площадь петли составляет около  $41 \text{ м}^2$ . Компенсирующий диполь состоит из 12 витков и монтируется, как показано синим цветом (диполь С). Площадь его петли составляет около  $7 \text{ м}^2$ .

В варианте установки на вертолет Ми-8 площади петель основного и компенсирующих диполей несколько отличаются от варианта Ан-2. В вертолетном варианте компенсирующих диполей два. Выполненные в виде соленоидальных петель, диполи устанавливаются таким образом, чтобы по возможности их центры геометрически совместились с центром основной петли.

### 3. Принцип измерений

В основу измерительного процесса аппаратуры EM-4H положено высокоточное измерение амплитудно-фазовых параметров (или квадратурных компонент) гармонических сигналов, реализованное методом синхронного детектирования. Высокая точность вычисления квадратурных компонент достигается использованием в этом измерительном процессе методов цифровой обработки сигналов.

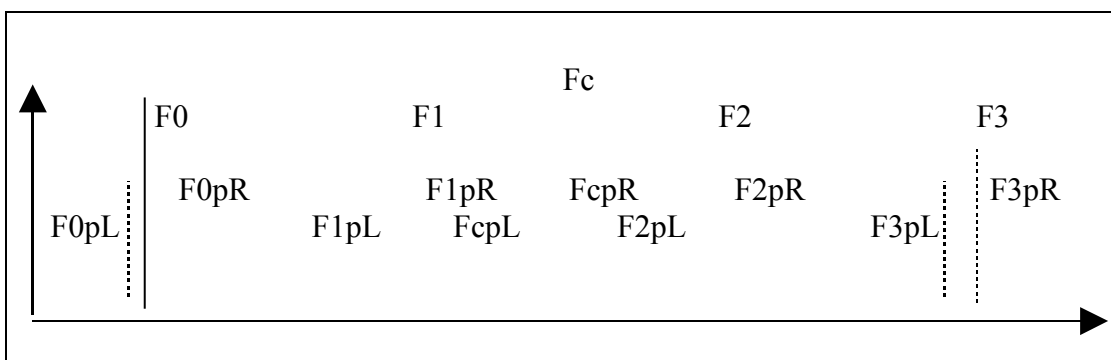
#### 3.1 Обработка сигналов

Основу системы цифровой обработки сигналов комплекса EM-4H составляет пара сигнальных процессоров ADSP-21262. Система, таким образом, является распределенной. Один из процессоров установлен в передатчике, другой – в приемнике. Процессоры связаны между собой высокоскоростной магистралью передачи данных и синхронизации, передающей линией которой является витая пара троса-кабеля. Оба процессора осуществляют синхронные вычисления квадратурных компонент сигналов для всех рабочих частот.

Процессор приемника вычисляет амплитудно-фазовые параметры сигналов в приемных рамках, а процессор передатчика – амплитудно-фазовые параметры сигналов напряжения и тока на основной петле генератора и токов в петлях компенсаторов.

Для обеспечения дополнительной стабильности измерений с учетом возможных дрейфов для контроля амплитудно-фазовых характеристик измерительных каналов система оснащена дополнительными источниками эталонных сигналов, так называемых пилот-сигналов. Пилот-сигнал в данном случае представляет собой набор дополнительных гармонических сигналов, частоты которых отличаются от рабочих частот.

Частоты пилотирования расположены симметрично слева и справа от каждой из рабочих частот и отстоят от них на 6 Гц, как показано на рисунке. Параметры пилотирующего сигнала измеряются точно так же, как и сигналы рабочих частот, что, собственно, и позволяет судить об изменении амплитудно-фазовых параметров измерительного тракта.



Расположение частот пилотирования

Поскольку частоты пилотирующих сигналов для каждой из рабочих частот отличаются от нее самой весьма незначительно, значение параметров АЧХ и ФЧХ для нее может быть вычислено исходя из измеренных значений амплитуды и фазы соответствующей пары пилотирующих частот.



### 3.2 Метод компенсации

После счисления квадратурных компонент для всех рабочих частот и коррекции измерений за изменения параметров сигналов пилотирования и контроля токов генератора можно считать, что на каждой из рабочих частот приемными рамками системы измерен трехмерный комплексный вектор квадратурных компонент. Этот вектор в свою очередь может быть разделен на два трехмерных действительных вектора реальной (синфазной) и мнимой (квадратурной) компонент. Все дальнейшие вычисления выполняются исходя из предположений о том, что на каждой из рабочих частот излучатель представляет собой точечный диполь, причем их центры совпадают.

В отличие от классического метода ДИП в системе ЕМ-4Н осуществляется контроль и стабилизация фазы. Таким образом, на большой высоте полета, в отсутствие влияния проводимости земли амплитудно-фазовые компоненты сигнала на каждой из рабочих частот должны образовывать чисто реальный вектор, мнимые компоненты, обусловленные некоторыми аппаратными систематическими ошибками, а также влиянием проводимости летательного аппарата в поле передатчика, должны быть скомпенсированы.

Задача компенсации сводится, таким образом, к подбору амплитудного коэффициента и сдвига фазы для каждой из частот так, чтобы суммарный сигнал при отсутствии отклика от Земли был линейно поляризован. Если сигнал представить в виде комплексного числа

$$Ae^{i\varphi} = A(\cos^{\circ}\varphi + i\sin^{\circ}\varphi),$$

а за начальное значение фазы взять ноль фазы генератора, то поставленное условие будет достигнуто при равенстве нулю мнимой компоненты вектора измерений:

$$\mathbf{Z}\mathbf{X} = \mathbf{M}\mathbf{X} \cdot \mathbf{T}\mathbf{X} + \mathbf{N}\mathbf{X}_1 \cdot \mathbf{C}_1 + \mathbf{N}\mathbf{X}_2 \cdot \mathbf{C}_2, \quad X = 0, \dots, 3, \quad (1)$$

где  $\mathbf{Z}\mathbf{X}$  – скомпенсированный трехмерный комплексный вектор на частоте  $F_X$ ;  $\mathbf{T}\mathbf{X}$  – измеренный трехмерный комплексный вектор на частоте  $F_X$ ;  $\mathbf{C}_1$  – трехмерный действительный вектор, взятый как большая полуось эллипса поляризации на частоте 667 Гц;  $\mathbf{C}_2$  – трехмерный действительный вектор, взятый как большая полуось эллипса поляризации на частоте 833 Гц (используется только в вертолетном варианте);  $\mathbf{M}\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{N}\mathbf{X}_1$ ,  $\mathbf{N}\mathbf{X}_2$  – комплексные матрицы размерности  $3 \times 3$  ( $\mathbf{N}\mathbf{X}_2$  используется только в вертолетном варианте). Выражение (1) представляет собой общий вид компенсирующего правила.

Для определения параметров этого правила необходимо получить эталонные данные в ходе специального калибровочного эксперимента – носителю необходимо набрать значительную высоту полета и выполнить ряд пилотажных эволюций, при которых изменяется взаимное расположение передающих диполей и приемных рамок. На основе полученных данных могут быть вычислены параметры компенсирующего правила.

### 3.3 Бортовая программа и наблюдаемые параметры

Все взаимодействие с системой ЕМ-4Н осуществляется с использованием бортовой ЭВМ и программы TERM\_D. Бортовая программа позволяет оператору контролировать все интересующие его параметры. Ими могут быть квадратурные компоненты по каждой из основных и пилотирующих частот в каждом канале измерений, а также максимальные значения амплитуды сигнала в этих каналах.

Кроме того, используя в качестве исходных данных значения квадратурных компонент, программа вычисляет традиционные для метода ДИП инварианты для каждой из рабочих частот:

- амплитуду большой полуоси эллипса поляризации;
- отношение малой и большой полуосей эллипса поляризации (эллиптичность);
- угол большой полуоси эллипса поляризации в системе координат продольно-вертикальных приемных рамок.

## 4. Порядок работы

### 4.1 Подготовка и монтаж аппаратуры

Установку аппаратуры на борту производите в соответствии с установочной документацией и электрической схемой комплекса. Помните, что при работе аппаратуры в блоке генератора и на разъемах сигналов петель действуют опасные высокие напряжения. Никогда не включайте прибор со снятыми защитными крышками.

Особое внимание при монтаже обратите на правильность расположения петель и надежность их крепления.

### 4.2. Включение и проверка

После монтажа аппаратуры произведите проверку работоспособности комплекса. Для этого размотайте трос-кабель и отнесите гондолу на рабочую дистанцию от самолета и передатчика. Не забудьте подсоединить трос-кабель к блоку генератора.

### 4.3. Запуск и настройка

После того, как была выпущена гондола, и трос-кабель подсоединен к блоку передатчика, комплекс можно включать.

Для этого надо сначала включить тумблер PRIM. POWER (вверх – включено). При этом загорится индикатор PWR OK и сработают защиты ключей. Через 5-10 секунд генератор выйдет на нормальный режим работы. При этом индикатор PWR OK должен устойчиво гореть зеленым цветом, а индикаторы PROTECTION должны быть погашены.

После этого следует включить тумблер SEC. POWER (вверх – включено). При нормальной работе индикатор DATA EXIST. стабильно горит синим цветом.

В первую очередь необходимо убедиться в наличии устойчивой передачи данных по тросу-кабелю, то есть не загорается индикатор CAB. ERR. красным цветом, и не растет значение параметра счетчика ошибок в кабеле (наблюдается в бортовой программе). Этот параметр при запуске может быть и не равен нулю, однако меняться не должен.

Единственные параметры, которые можно наблюдать с помощью бортовой программы сразу после включения питания – это сигналы пилотирования генератора. Все остальные сигналы выключены. Этот режим позволяет оценить уровень шумов в каналах приемника.

Далее внимание следует обратить на значения амплитуды на низкой частоте при механическом воздействии на гондолу. Оно должно составлять величину порядка первых единиц младшего значащего разряда. К сожалению, не удается полностью изолировать приемные рамки от механического контакта с корпусом гондолы.

Изредка, при принудительной раскачке в полете во время компенсации может произойти касание приемных рамок о стенку гондолы, что приводит к скачку в значениях амплитуды. Однако если скачки происходят постоянно и даже в спокойном полете, значит необходимо проверить состояние подвеса приемника, вероятно рамки лежат на ограничителях.

Этот режим работы можно проверить и на земле, принимая, однако во внимание возможность действия промышленных помех. Качество подвеса можно

проконтролировать, постукивая по корпусу гондолы непроводящим электричество предметом и наблюдая амплитуды сигналов на низкой частоте.

После проверки системы на чувствительность к механическим воздействиям следует убедиться в работоспособности передатчика и системы в целом. Для этого, используя бортовую программу, следует включить сигналы возбуждающего поля.

Сигналы возбуждения можно включать как на каждой частоте по отдельности, так и все вместе. После того, как заработало возбуждение на определенной частоте, соответствующий сигнал появится в канале контроля параметров тока генератора и приемных рамок. При появлении устойчивого сигнала в приемных рамках включится пилотирование приемника, а затем оно будет работать, не выключаясь, вне зависимости от наличия или отсутствия сигнала возбуждения.

Теперь, когда все сигналы в системе включены, и нормально измеряются, можно приступить к работе в полете, выполнению компенсации и проведению съемки.

#### 4.4 Компенсация

Процесс компенсации осуществляется следующим образом:

1. На значительной высоте полета, где влиянием земли можно пренебречь (600 – 700 метров), выполняется накопление данных для вычисления компенсирующего правила. Для этого следует набрать высоту, а далее, воспользовавшись возможностями бортовой программы, выполнить следующие действия:

- Очистить статистику накопления, выполнив команду CLEAR.
- Выполнить серию качаний по тангажу и крену так, чтобы гондола побывала в различных точках относительно самолета. Выполнение этой операции требует от оператора некоторого опыта и согласованных действий пилота. Операция накопления обычно занимает несколько минут.
- После того, как данные контрольной выборки будут накоплены, и счетчик накопленных значений будет показывать разумное число отсчетов, по крайней мере несколько сотен, следует зафиксировать выборку, выполнив команду FIX. При этом счетчик значений защелкивается, а накопленная выборка обрабатывается, в результате чего будет вычислено компенсирующее правило.
- Применить вновь созданное компенсирующее правило, включив режим компенсации. Режим компенсации теперь можно включать и выключать, проверяя работу корректирующего правила. При анализе качества компенсации следует обращать внимание на значение параметра угла большой полуоси эллипса поляризации по одной из частот – он дает хорошее представление об угловых эволюциях гондолы. Если при эволюциях значения отношения полуосей эллипсов поляризации составляют величину порядка 0.001, можно говорить о том, что компенсация прошла успешно.
- Если качество компенсации оказалось неудовлетворительным, что возможно при сбоях и помехах во время процедур компенсации, можно повторно выполнять команду FIX, увеличивая выборку. Или повторить всю процедуру снова.

Следует отметить, что на борту летательного аппарата режим компенсации носит контрольный характер. Он необходим только для того, чтобы оператор убедился в работоспособности аппаратуры в наиболее сложном режиме. Включение и выключение режима компенсации, равно как и накопление и обнуление, никакого влияния на записываемые данные не оказывает.

Важно также иметь в виду, что при применении компенсирующего правила меняются отображаемые амплитуды сигналов в приемнике. После применения компенсирующего правила, они измеряются уже не в единицах младшего значащего разряда АЦП, как это было при выключенной компенсации, а выровнены на одинаковую амплитуду по всем частотам. При этом, конечно же, обнуление мнимой компоненты поля в сигнале возбуждения происходит с учетом сигналов пилотирования и амплитуд и фаз сигналов генератора.



## 5. Обработка данных

Технологическое программное обеспечение для обработки данных EM-4H состоит из двух программ: UNGEN и UGOL.

### 5.1 Программа UNGEN

Программа UNGEN в разных версиях может иметь название `ung_hdip.exe` (для вертолета), `ung_hdi5.exe` (для самолета). Эта программа изменяет амплитуду сигналов и фазу детектирования частот в каналах приемника и генератора, осуществляет временную и позиционную привязку сигналов, определяет и вводит амплитудные и фазовые поправки основных сигналов по сигналам пилотирования, вводит поправки за измеренные амплитуды и фазы сигналов генератора.

Результатом работы программы являются подготовленные к дальнейшей обработке файл бинарных данных, содержащий значения квадратурных компонент по трем осям приемника всех частот, включая частоты компенсатора ( $F_0, \dots, F_3, F_C$ ). Формат запуска программы следующий:

```
>ungen in.dlg out.dat [/key ...]
```

`in.dlg` – входной файл данных, записанный на борту программой Лоцман; `out.dat` – выходной файл, для последующей работы программы UGOL; возможно указание списка ключей из следующего набора:

`/pil` – выводить сигнал пилотирования по высокой частоте в текстовый файл `pilotir.xyz`.

В файл выводятся по порядку время, квадратурные компоненты правого пилотирования частоты  $F_3$ , осредненные за соответствующий интервал, по первой катушке, по второй, по третьей, и флаг ошибок. Значения флага ошибок будут описаны ниже.

`/dat` – выводить амплитуду сигнала по низкой частоте в текстовый файл `demodat.xyz`.

В файл выводятся по порядку время, амплитуда сигнала по первой катушке, по второй, по третьей, радиовысота (если писалась в `dlg`-файл), флаг ошибок, цифровой номер маршрута. Значения флага ошибок будут описаны ниже.

`/o123` – изменить порядок катушек приемника на указанный, 123 – значение по умолчанию. Для корректной работы необходимо, чтобы сначала шло значение вертикальной компоненты, положительное направление – вниз, затем продольной, положительное направление – назад, и последняя компонента – боковая. Порядок катушек можно определить по файлу `demodat.xyz`: максимальная амплитуда всегда в продольной катушке, а при тангажных эволюциях продольная компонента взаимно перекладывается с вертикальной. Например, если максимальная амплитуда в канале 1, а при тангаже она перекладывается в канал 3, то необходимо задать `/o312`. Далее надо запустить программу UGOL и проверить знаки реальных компонент. Если, например, продольная компонента отрицательна, надо перезапустить UNGEN с ключом `/o3-12`, а если продольная компонента положительна, а отношение полуосей при приближении гондолы к земле отрицательно, то с ключом `/o-312`.

`/Kn,n,n` – задание коэффициентов усиления по катушкам, по умолчанию  $n=1$ .

`/fP0.02` – порог изменения пилотирования, превышение которого считается некондиционным, по умолчанию 0.02.

`/fD0.01` – порог изменения сигнала, превышение которого считается некондиционным, по умолчанию 0.01.

## 5.2 Программа UGOL

Программа UGOL в разных версиях может иметь название `ugl_hdip.exe` (для вертолета), `ugl_adip.exe` (для самолета). Эта программа выполняет математическую компенсацию согласно соотношению (1). Результатом работы программы являются преобразованные к форматам программы Геософт параметры данных EM-4H, записанные в виде текстового файла. Формат запуска программы следующий:

```
>ugol in.dat out.xyz [/key ...]
```

`in.dat` – входной бинарный файл, полученный программой UNGEN; `out.xyz` – имя выходного файла; возможно указание списка ключей из следующего набора:

`/Snnn,nnnnn` – задать левую и правую границы зоны компенсации, в номерах отсчетов от начала файла. Зоны компенсации должны соответствовать времени выполнения процедур компенсации в реальном полете, где был включен сигнал и выполнялись эволюции. Определить эти зоны в номерах отсчетов можно, используя файл `demodat.xyz`, создаваемый программой UNGEN.

Таких зон можно задать несколько. `/C1231,2500 /C18300,19000 /C31111,33000` – задают три зоны компенсации.

`/Hnnn` – задать зоны компенсации там, где высота была больше заданной.  
`/H500` – включать в зоны компенсации все данные с высотой больше 500 метров.

`/a` – вывести все данные без разбиения на маршруты.

`/mNN` – задать маску для флага ошибок, определяет при каких ошибках данные выводить, а при каких – нет. `/m0` – выводить все данные, `/m31` – не выводить данные при любой ошибке. По умолчанию стоит маска `/m24`. Значения флагов ошибок описано ниже.

`/f` – выводить значение флагов ошибок в выходной файл.

Флаг ошибок представлен 5-битным числом, каждый бит в котором связан с определенным типом ошибки в измерениях.

бит 1 (1) – зашкал АЦП хотя бы в одном из каналов (`BAD_MAX`);

бит 2 (2) – пропуск данных (`BAD_SEQ`);

бит 3 (4) – скачок пилотирования превысил порог, заданный в программе UNGEN (`BAD_PIL`);

бит 4 (8) – скачок в сигнале генератора, или отсутствие сигнала генератора (`BAD_GEN`);

бит 5 (16) – скачок сигнала превысил порог, заданный в программе UNGEN (`BAD_DAT`);

Пример: значение параметра флагов, равное  $27=16+8+2+1$

*Замечание.* Указание маски флагов никак не влияет на режим работы компенсации. Компенсация всегда проходит без данных, помеченных `BAD_DAT`, `BAD_GEN`, `BAD_MAX`. Тем не менее, задание порогов в программе `ungen` может повлиять на расстановку флагов `BAD_DAT`, тем самым оказывает влияние на данные в зоне компенсации.

Формат вывода данных в выходной файл `xyz` следующий:

`Time1` – время UTC (секунды от начала 1980 года).

`Time2` – GPS-время текущего дня в формате `hh:mm:ss.s` (часы : минуты : секунды . доли секунд)

- Lat – географическая широта, в градусах.  
 Lon – географическая долгота, в градусах.  
 AltG – высота над геоидом WGS84 (по показаниям GPS-приемника), в метрах.  
 AltR – высота над рельефом (по показаниям радиовысотомера), в метрах.  
 Mag – канал измерений магнитометра, нТл.  
 Flag – флаги ошибок.  
 hor\_dist - смещение гондолы вдоль продольной оси самолета.  
 ver\_dist - смещение гондолы вдоль направления вертикального диполя.  
 theta\_2D - угол, отсчитанный от направления вертикального диполя до направления на гондолу, полученный с учетом предположения о горизонтальности продольной оси приемника.  
 theta\_3D - угол, отсчитанный от направления вертикального диполя до направления на гондолу, полученный по измерениям взаимной ориентации трех возбуждаемых диполей, доступен только в вертолетном варианте.  
 el4 – эллиптичность верхней частоты (8320 Гц), безразмерная. Это инвариант эллипса поляризации, по модулю равный отношению модуля малой полуоси эллипса к модулю большой; знак эллиптичности выбирается исходя из направления проекции вектора малой полуоси эллипса поляризации на ось Z приемника (вниз – положительное значение).  
 sq4 – сумма квадратов большой и малой полуосей эллипса поляризации на верхней частоте, безразмерная.  
 ug4 – угол направления большой полуоси вектора поляризации, определяет геометрическую ориентацию системы в ЭМ поле. вычисляется как арктангенс отношения Z- и X-компонент вектора большой полуоси эллипса поляризации, в радианах.  
 ReZ4 – вещественная часть вертикальной в осях приемника компоненты измеренного сигнала, безразмерная.  
 ImZ4 – мнимая часть вертикальной в осях приемника компоненты измеренного сигнала, безразмерная.  
 ReX4 – вещественная часть продольной в осях приемника компоненты измеренного сигнала, безразмерная.  
 ImX4 – мнимая часть продольной в осях приемника компоненты измеренного сигнала, безразмерная.  
 ReY4 – вещественная часть боковой в осях приемника компоненты измеренного сигнала, безразмерная.  
 ImY4 – мнимая часть боковой в осях приемника компоненты измеренного сигнала, безразмерная.  
 ReHz4 - вещественная часть вертикальной (вдоль возбуждающего диполя) компонента сигнала.  
 ImHz4 - мнимая часть вертикальной (вдоль возбуждающего диполя) компонента сигнала.  
 ReHr4 - вещественная часть горизонтальной (перпендикулярно возбуждающему диполя в направлении гондолы) компонента сигнала.  
 ImHr4 - мнимая часть горизонтальной (перпендикулярно возбуждающему диполя в направлении гондолы) компонента сигнала.  
 el3, sq3, ug3, ReZ3, ImZ3, ReX3, ImX3, ReY3, ImY3, ReHz3, ImHz3, ReHr3, ImHr3 – аналогично для частоты 2080 Гц.  
 el2, sq2, ug2, ReZ2, ImZ2, ReX2, ImX2, ReY2, ImY2, ReHz2, ImHz2, ReHr2, ImHr2 – аналогично для частоты 520 Гц.  
 el1, sq1, ug1, ReZ1, ImZ1, ReX1, ImX1, ReY1, ImY1, ReHz1, ImHz1, ReHr1, ImHr1 – аналогично для частоты 130 Гц.

### 5.3 Общие замечания к дальнейшей интерпретационной обработке

Полученные в результате всех вышеперечисленных операций, данные позволяют геофизику выполнить их содержательную интерпретацию. Как ее производить, и какими инвариантами пользоваться – вопрос квалификации, традиционной приверженности и системы воззрений геофизика-интерпретатора. И тем не менее позволим себе привести некоторые замечания.

Параметры, измеряемые комплексом ЕМ-4Н, при обработке до сих пор используются весьма фрагментарно. Это объясняется значительной сложностью обработки электроразведочных данных, как таковых.

Хотелось бы обратить внимание на то, что в измеренных сигналах полностью присутствует мнимый вектор, представляющий чистый отклик, измеренный с не меньшей точностью, чем отношение полуосей. При этом возможен пересчет в величины  $\rho_{рт}$ . Для этого достаточно разделить все компоненты поля на модуль вектора реальной компоненты частоты 130 Гц и умножить на 1 000 000. Даже на низкоомном (менее 30 Ом) разрезе наличие синфазной компоненты отклика не приведет к искажениям после такой нормировки, поскольку этот отклик незначительно изменяет модуль реальной компоненты.

На более высокоомных разрезах, как показывают расчеты, синфазная компонента отклика на частоте 130 Гц пренебрежимо мала. Это позволяет говорить о том, что на низкой частоте в реальной части мы измеряем поле возбуждения в чистом виде. А поскольку после калибровки в зоне компенсации все вектора, на всех частотах возбуждения, совпадают, можно вычесть реальный вектор 130 Гц из реальных векторов на других частотах и получить синфазные компоненты отклика с удовлетворительной точностью.

С учетом высоты над рельефом можно определить и кажущееся сопротивление для каждой частоты или для пары частот.

И еще одно замечание. Учитывая геометрические особенности пространственно разнесенной конструкции комплекса ЕМ-4Н, следует помнить, что маршруты противоположных направлений увяжутся между собой лишь в случае идеальной горизонтально слоистой среды. Поэтому при обработке, как правило, увязывают маршруты для каждого направления отдельно, и лишь потом, по двум полученным картам строят карту совместную.

## 6. Вычисление параметров эллипса поляризации.

Пусть поле возбуждающего диполя на частоте  $\omega$  задается соотношением

$$M \cos \omega t.$$

В точке расположения приемника электроразведочной системы суммарный вектор поля возбуждения и поля отклика всегда можно представить следующим образом:

$$\vec{H} = \vec{H}_c \cos \omega t + \vec{H}_s \sin \omega t.$$

Для детектирования косинусной и синусной компоненты поля берутся такие интегралы:

$$\begin{aligned} \vec{H}_c &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \vec{H} \cos \omega t dt, \\ \vec{H}_s &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \vec{H} \sin \omega t dt. \end{aligned} \quad (1)$$

Если второе соотношение из (1) умножить на  $i$  и прибавить к первому, получим запись формул детектирования в комплексной форме:

$$\vec{C} = \vec{H}_c + i \vec{H}_s = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} H (\cos \omega t + i \sin \omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} H e^{i\omega t} dt. \quad (2)$$

Поэтому вектор  $\vec{H}_c$  также называют действительной компонентой поля, а вектор  $\vec{H}_s$  – мнимой.

Попробуем теперь провести детектирование в фазе, смещенной относительно фазы возбуждения. Для этого в формуле (2) надо брать свертку не с  $e^{i\omega t}$ , а с  $e^{i(\omega t + \phi)}$ , где  $\phi$  – новая фаза детектирования. Очевидно, мы получим следующий результат:

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} H e^{i(\omega t + \phi)} dt = \frac{e^{i\phi}}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} H e^{i\omega t} dt = e^{i\phi} (\vec{H}_c + i \vec{H}_s). \quad (3)$$

Вот как выглядят действительный и мнимый векторы при таком детектировании:

$$\begin{aligned} \vec{A}(\phi) &= \Re [e^{i\phi} (\vec{H}_c + i \vec{H}_s)] = \vec{H}_c \cos \phi - \vec{H}_s \sin \phi \\ \vec{B}(\phi) &= \Im [e^{i\phi} (\vec{H}_c + i \vec{H}_s)] = \vec{H}_c \sin \phi + \vec{H}_s \cos \phi \end{aligned} \quad (4)$$

Легко убедиться в следующем:

- при  $\phi = 0$  векторы из соотношений (4) совпадают с векторами из соотношений (1);
- $\vec{A}(\phi) = \vec{B}(\phi + \pi/2)$ , а значит, при прохождении всех значений фазы детектирования  $\phi$  от 0 до  $2\pi$  концы векторов  $\vec{A}, \vec{B}$  проходят по одной и той же траектории;
- в системе координат с базисом из векторов  $\vec{H}_c, \vec{H}_s$  соотношение (4) задает окружность, а значит, в исходной системе координат, базис которой связан с  $\vec{H}_c, \vec{H}_s$  аффинным преобразованием, эта траектория является эллипсом.

Таким образом, при измерении поля  $\vec{H}$  можно говорить об эллипсе, который никак не зависит от фазы детектирования. Его называют эллипсом поляризации. Можно подобрать фазу детектирования так, чтобы вектор  $\vec{A}$  совпал с большой полуосью эллипса. В этой фазе модуль вектора  $\vec{A}$ , а также квадрат модуля  $A^2 = (\vec{A}, \vec{A})$ , достигают максимума. Выпишем нужные соотношения.

$$\begin{aligned} A^2 &= (\vec{H}_c \cos \phi - \vec{H}_s \sin \phi, \vec{H}_c \cos \phi - \vec{H}_s \sin \phi) = \\ &= H_c^2 \cos^2 \phi + H_s^2 \sin^2 \phi - 2(\vec{H}_c, \vec{H}_s) \cos \phi \sin \phi = \\ &= \frac{1}{2}(H_c^2 + H_s^2) + \frac{1}{2}(H_c^2 - H_s^2) \cos 2\phi - (\vec{H}_c, \vec{H}_s) \sin 2\phi. \end{aligned}$$

Необходимым условием максимума является

$$\frac{\partial A^2}{\partial \phi} = -(H_c^2 - H_s^2) \sin 2\phi - 2(\vec{H}_c, \vec{H}_s) \cos 2\phi = 0.$$



Это же условие является условием минимума. Поэтому решения данного уравнения дают и большую, и малую полуось эллипса поляризации. Запишем полученное уравнение в таком виде:

$$\tan(2\phi_0) = \frac{2(\vec{H}_c, \vec{H}_s)}{(H_s^2 - H_c^2)}. \quad (5)$$

Прделаем те же операции для вектора  $\vec{B}$ .

$$\begin{aligned} B^2 &= (\vec{H}_c \sin \phi + \vec{H}_s \cos \phi, \vec{H}_c \sin \phi + \vec{H}_s \cos \phi) = \\ &= H_c^2 \sin^2 \phi + H_s^2 \cos^2 \phi + 2(\vec{H}_c, \vec{H}_s) \cos \phi \sin \phi = \\ &= \frac{1}{2}(H_c^2 + H_s^2) + \frac{1}{2}(-H_c^2 + H_s^2) \cos 2\phi + (\vec{H}_c, \vec{H}_s) \sin 2\phi. \end{aligned}$$

Необходимым условием максимума (минимума) является

$$\frac{\partial B^2}{\partial \phi} = (H_c^2 - H_s^2) \sin 2\phi + 2(\vec{H}_c, \vec{H}_s) \cos 2\phi = 0.$$

Мы опять пришли к уравнению (5), значит, действительный и мнимый векторы достигают экстремумов одновременно. Решение уравнения (5) дает четыре различных значения фазы:

$$\phi_0 = \frac{1}{2} \arctan \frac{2(\vec{H}_c, \vec{H}_s)}{(H_s^2 - H_c^2)} + \frac{\pi n}{2}, \quad n = 0, 1, 2, 3.$$

В силу непрерывности соотношения (4), задающего эллипс поляризации, эти решения последовательно дают то большую, то малую полуось. А поскольку действительный и мнимый векторы повторяют друг друга через  $\pi/2$ , то становится очевидна справедливость следующей леммы:

**Лемма 1.** Если при какой-то фазе детектирования действительный вектор является вектором большой полуоси эллипса поляризации, то мнимый вектор задает его малую полуось, и наоборот.

Воспользуемся уравнением (5) для получения формулы отношения полуосей эллипса поляризации. Запишем его в несколько другом виде:

$$\tan(-2\phi_0) = \frac{2(\vec{H}_c, \vec{H}_s)}{(H_c^2 - H_s^2)}. \quad (5')$$

Рассмотрим следующее комплексное число:

$$C^2 = (\vec{H}_c + i\vec{H}_s, \vec{H}_c + i\vec{H}_s) = (H_c^2 - H_s^2) + 2i(\vec{H}_c, \vec{H}_s).$$

При попытке определить фазу числа  $C^2$ , тангенс которой есть отношение мнимой и действительной частей  $C^2$ , мы получим:

$$\frac{\Im C^2}{\Re C^2} = \frac{2(\vec{H}_c, \vec{H}_s)}{(H_c^2 - H_s^2)}. \quad (6)$$

Поскольку правые части (5') и (6) совпадают, мы получаем, что фаза  $C^2$  равна  $-2\phi_0$ . Извлекая квадратный корень из этого числа, можно получить число с фазой  $-\phi_0$ :

$$\sqrt{C^2} = |\sqrt{C^2}| e^{-i\phi_0} \Rightarrow e^{-i\phi_0} = \frac{\sqrt{C^2}}{|\sqrt{C^2}|}.$$

Обращая последнее выражение, получим:

$$e^{i\phi_0} = \frac{|\sqrt{C^2}|}{\sqrt{C^2}} = \frac{|\sqrt{(\vec{H}_c + i\vec{H}_s, \vec{H}_c + i\vec{H}_s)}|}{\sqrt{(\vec{H}_c + i\vec{H}_s, \vec{H}_c + i\vec{H}_s)}}. \quad (7)$$

Пользуясь выражением (7), вектор в произвольной фазе детектирования, в частности, в фазе поля возбуждения, равной в нашем случае нулю, можно привести к фазе большой полуоси. Согласно соотношению (3), надо просто умножить данный вектор на  $e^{i\phi_0}$  :

$$\vec{H}_a + i\vec{H}_b = \vec{C} e^{i\phi_0} = (\vec{H}_c + i\vec{H}_s) \frac{|\sqrt{(\vec{H}_c + i\vec{H}_s, \vec{H}_c + i\vec{H}_s)}|}{\sqrt{(\vec{H}_c + i\vec{H}_s, \vec{H}_c + i\vec{H}_s)}}. \quad (8)$$

Согласно Лемме 1 векторы  $\vec{H}_a, \vec{H}_b$  задают большую и малую полуоси эллипса поляризации. Отсюда отношение полуосей легко находится:

$$\frac{|\vec{H}_b|}{|\vec{H}_a|} = \frac{\Im[\vec{C} e^{i\phi_0}]}{\Re[\vec{C} e^{i\phi_0}]} \quad (9)$$

Неоднозначность в выборе решения уравнения (5) убирается из следующих соображений. Во-первых,  $|\vec{H}_a| > |\vec{H}_b|$ . Во-вторых, из двух больших полуосей всегда выбираем ту, что ближе к действительному вектору в фазе возбуждающего поля,  $(\vec{H}_a, \vec{H}_c) > 0$ . Благодаря малости отклика по сравнению с сигналом возбуждения, векторы  $\vec{H}_a$  и  $\vec{H}_c$  получаются довольно близкими.