

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ГИРОСКОПОВ НА АТОМНОМ СПИНЕ

Власова М.А. (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»),
Научный руководитель – заместитель начальника лаборатории Шевченко А.Н.
(Акционерное общество "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор")

В работе проведен сравнительный анализ выходного сигнала двух типов гироскопов на атомном спине. Также проведено сопоставление систем стабилизации магнитных полей и исследованы факторы, влияющие на масштабный коэффициент гироскопов.

Введение. В настоящее время наблюдается повышенный интерес к разработке и внедрению квантовых сенсоров, включая сенсоры на изотопах инертных газов. Они обеспечивают высокоточное измерение магнитных полей и вращения за счет длительного времени когерентности атомных спинов поляризованных изотопов инертного газа. Гироскопы (сенсоры чувствительные к вращению) на атомном спине привлекают внимание ученых благодаря их потенциальной высокой точности, малому энергопотреблению и компактным размерам. Не так давно появились публикации о позиционных гироскопах на основе ко-магнитометров. Такие гироскопы требуют создания специальных условий для рабочего вещества - отсутствие спин-обменного уширения, стремящаяся к нулю напряженность магнитного поля, а также температура более 150°C. Такие гироскопы могут достигать чувствительности около $0,002 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ за счет компенсации магнитных помех и градиентов. Однако, требуемые условия, в некоторой степени, сложны в реализации. На практике компания Northrop Grumman представила динамический гироскоп на атомном спине с объемом чувствительного элемента 10 см^3 , и получила на нем чувствительность $0,005 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. В отличие от позиционного гироскопа на ко-магнитометре, влияние шума магнитного поля на сдвиг частоты ядерного магнитного резонанса в динамическом гироскопе может быть вычислен путем измерения сдвигов частоты двух типов изотопов инертного газа одновременно. Несмотря на внешние отличия, два этих типа гироскопов на атомном спине имеют общую природу. В представленной работе проанализирован компенсационный механизм позиционного и динамического гироскопов, проведено сравнение моделей их выходных сигналов и получены выражения для масштабного коэффициента этих гироскопов.

Сопоставление физических принципов. Рабочее вещество позиционного гироскопа, в котором создаётся суммарная намагниченность, полностью изолировано от внешних магнитных полей. Магнитный момент рабочего вещества гироскопа создаётся методами, разработанными в технике ядерного магнитного резонанса, например, оптической ориентации. Величина постоянного магнитного поля равна нулю, а вектор намагниченности сохраняет свою ориентацию в инерциальном пространстве. Выходной сигнал такого гироскопа пропорционален углу поворота системы относительно неподвижного вектора намагниченности.

Принцип работы динамического гироскопа на эффекте ядерного магнитного резонанса заключается в следующем. В постоянном магнитном поле вектор намагниченности рабочего вещества (так же, как и вектор суммарного механического момента) прецессирует с Ларморовой частотой, зависящей от гиромагнитного отношения ядер изотопов рабочего вещества. Если система вращается вокруг направления магнитного поля, то происходит смещение частоты прецессии на величину угловой скорости вращения. Угол и скорость поворота системы, можно вычислить, измеряя фазу и частоту прецессии.

Сравнительный анализ. Анализируя уравнения стабилизации, можно сделать вывод, что вне зависимости от типа гироскопа на атомном спине при построении системы стабилизации

магнитного поля по сигналу одного из изотопов в уравнениях стабилизации неизбежно появляется значение проекции скорости вращения на ось чувствительности гироскопа. Степень влияния вращения основания на работу системы стабилизации магнитного поля обратно пропорциональна гиромангнитному отношению изотопа инертного газа по сигналу которого производится компенсация флуктуация магнитного поля.

Изменение постоянной составляющей магнитного поля вдоль оси чувствительности динамического гироскопа, вызванного реакцией системы стабилизации на вращение основания, приведет к изменению скорости прецессии второго изотопа, сигнал которого используется для определения проекции скорости вращения основания на ось чувствительности. Аналогично для статического гироскопа, чувствительность системы стабилизации поля к вращению основания приведет к дополнительному повороту поляризации паров щелочного металла. Таким образом, оба типа гироскопов будут иметь не единичный масштабный коэффициент. Выходные сигналы обоих гироскопов также можно сравнить и сделать вывод о схожей точности. С одной стороны, масштабный коэффициент позиционного гироскопа всегда больше, чем динамического из-за различия гиромангнитных отношений на три порядка, а с другой стороны поперечная релаксация поляризации ядерного спина, наоборот, значительно выше в динамическом гироскопе, что нивелирует различия в достижимой чувствительности.

Заключение. В работе проанализированы общие принципы, лежащие в основе двух активно развивающихся типов гироскопов на атомном спине. Хотя на первый взгляд эти два типа гироскопов кажутся разными, на самом деле они имеют общую природу. В каждом используется спины по меньшей мере двух разных изотопов. Сигнал от одного из изотопов используется для компенсации флуктуаций магнитного поля, а сигнал от другого - для регистрации скорости вращения. В этой работе для проведения сравнительного анализа динамического и позиционного гироскопов выведены в одинаковой форме уравнения, описывающие работу системы компенсации и стабилизации магнитных полей. Результаты показали, что у обоих гироскопов одинаковый механизм компенсации, который может использоваться в дальнейших улучшениях атомных гироскопов, таких как устранение магнетизации паров щелочного металла. Сравнение выходного сигнала дает возможность посмотреть, как работает компенсация магнитных полей в позиционном гироскопе, и как магнитное поле влияет на масштабный коэффициент в динамическом гироскопе даже после компенсации. Взаимосвязь между входящим и выходящим сигналом может быть использована для выяснения источников различных ошибок.

Власова М.А. (автор)

Шевченко А.Н. (научный руководитель)