

БЕСПЛАТФОРМЕННАЯ ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ВОГ С УХОДОМ ОДНА МОРСКАЯ МИЛЯ В МЕСЯЦ: МЕЧТА УЖЕ ДОСТИЖИМА?

В 2006 г. на симпозиуме по гиротехнологиям Немецкого института навигации в г. Штутгарт была представлена конструкция и результаты испытаний системы MARINS – первой навигационной системы на основе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) с уходом одна морская миля (1853 м) в день [2]. Эта система сейчас находится в производстве и поставляется на многочисленные суда.

Современный уровень развития ВОГ не способен обеспечить требуемые характеристики даже при строго контролируемом терморегулировании. Первое, что нужно сделать, – это увеличить геометрический фактор путем увеличения диаметра и длины волоконной катушки, а также снизить шум измерения, более точно управлять длиной волны источника света, уменьшить температурный градиент, и др.

Введение

До настоящего времени специалисты компании iXBlue всегда добивались успеха в борьбе с технологическими проблемами при разработке ВОГ. Никаких физических ограничений на улучшение характеристик ВОГ пока не было. Поэтому теперь компания iXBlue, постоянно работающая над улучшением соотношения «цена–качество», решила исследовать возможности использования ВОГ в высокоточных бесплатформенных навигационных системах. В настоящей работе описываются результаты одного этапа исследования и анализируются следующие шаги. Используя круглые цифры, мы ставили своей задачей достижение точности определения местоположения 1 морская миля за 1 месяц плавания. Эти точности выдвигают особые требования к датчикам и пока бесплатформенные технологии не преуспели в достижении таких точностей.

Патюрель Ив. Главный инженер по инерциальным системам фирмы iXBlue, (г. Марли-ле-Руа, Франция).

Онтас Иоахин. Специалист по инерциальным системам и датчикам фирмы iXBlue.

Лефевр Эрве. Доктор наук, технический директор фирмы iXBlue.

Наполитано Фабьен. Доктор наук, директор по продвижению продукции фирмы iXBlue.

Научный редактор перевода к.т.н. А.А.Унтилов.

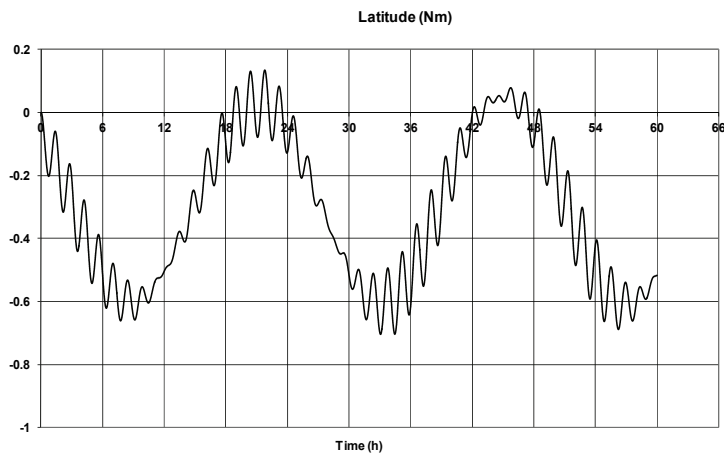
Статья по докладу на XX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

Требования к датчикам

В инерциальной навигационной системе большинство погрешностей датчиков приводит к колебательным навигационным ошибкам. Период колебаний составляет 84 мин (период Шулера) и 24 ч (период обращения Земли). Например, смещение нуля гироскопа в проекции на восточную ось создает колебательную синусоидальную составляющую погрешности с периодом 24 ч по широте и колебательную косинусоидальную ошибку с периодом 24 ч по долготе. Смещение нуля акселерометра приводит к колебательным ошибкам с периодом 84 мин по широте и долготе. Таким образом, все эти колебательные навигационные погрешности связаны.

Однако существует одна погрешность, которая дает неограниченную ошибку по долготе, – это ошибка измерения скорости вращения Земли. Она вызвана или смещением нуля вдоль оси вращения Земли, или погрешностью масштабного коэффициента при измерении скорости (15,041 град/ч). На рис. 1, *а* показан типичный график погрешности по широте как погрешности инерциальной навигации. Виден 24-часовой период и наложенные колебания с периодом 84 мин. На рис. 1, *б* – типичная погрешность по долготе как функция времени за 60 ч. Видны периоды колебаний 84 мин, 24 ч и линейный дрейф. Этот линейный дрейф и приводит к неограниченной погрешности по долготе.

а)



б)

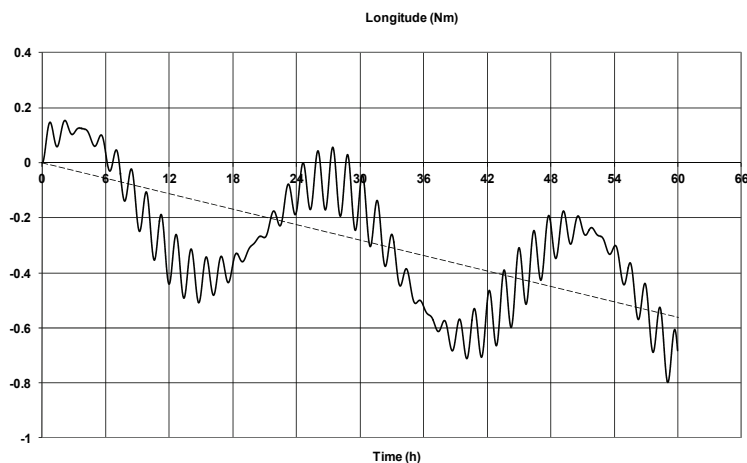


Рис. 1. Погрешности по широте (*а*) и по долготе (*б*) как функция времени (инерциальный режим)

Из вышесказанного следует, что наиболее важным параметром для долговременной инерциальной навигации является смещение нуля гироскопа. Очевидно, в высокоточной навигационной системе все параметры датчиков должны строго контролироваться, но именно смещение нуля должно быть на особо высоком уровне.

Чтобы обеспечить точность навигации на уровне 1 морская миля за месяц, смещение нуля должно быть не более $2 \cdot 10^{-5}$ град/ч. Также погрешность масштабного коэффициента измерения скорости Земли не должна быть более $2 \cdot 10^{-5}$ град/ч. Таким образом, погрешность масштабного коэффициента гироскопа необходима в пределах $1 \cdot 10^{-6}$ (1 ppm).

В целях обеспечения наилучшего качества работы при долговременной навигации без использования коррекции целесообразно оценивать смещения нулей гироскопов и акселерометров на этапе выставки. На этом этапе доступна коррекция координат (по спутниковым навигационным системам) и возможна оценка параметров. Для сокращения времени выставки необходимо, чтобы шум гироскопов был минимальным и влияние шума не превышало $2 \cdot 10^{-5}$ град/ч за 1 ч, случайный уход по углу должен быть менее $2 \cdot 10^{-5}$ град/ $\sqrt{\text{ч}}$.

Ранее используемые высокоточные технологии



Рис. 2. Электростатический гироскоп
(фото из музея ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

До настоящего времени навигационные системы подобного класса точности использовали следующие технологии:

- *электростатические гироскопы* (ЭСГ) (рис. 2): карданные платформы с использованием ЭСГ. Точность таких гироскопов превосходна, но они слишком сложны: в них применяется вращающаяся бериллиевая сфера, поддерживаемая в вакууме электрическим полем. Большое количество сложных механических и электрических деталей и карданная схема делают систему очень дорогой и недостаточно надежной;
- *автокомпенсационное вращение*: инерциальный измерительный модуль (ИИМ) на базе кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ) устанавливается на двухосном поворотном устройстве. Такой способ вращения позволяет снизить влияние смещения нуля гироскопов и акселерометров путем усредне-

ния положения каждой оси чувствительности ИИМ, чтобы она была ориентирована по всем направлениям в течение одинаковых промежутков времени. Метод обеспечивает высококачественную долговременную навигацию, но не лишен недостатков в части точности и зашумленности данных о крене и дифференте и точности определения мгновенной скорости. Оба эти изделия используют кардановы подвесы.

Почему ВОГ – подходящая технология для бесплатформенной навигационной системы?

Наш партнер, компания EADS-Astrium, для космических применений сравнила результаты измерения вариаций Алана за длительный период времени для разных типов гироскопов: волновой твердотельный гироскоп (ВТГ), КЛГ и ВОГ (два ВОГ – ASTRIX 120 и ASTRIX 200) (рис. 3).

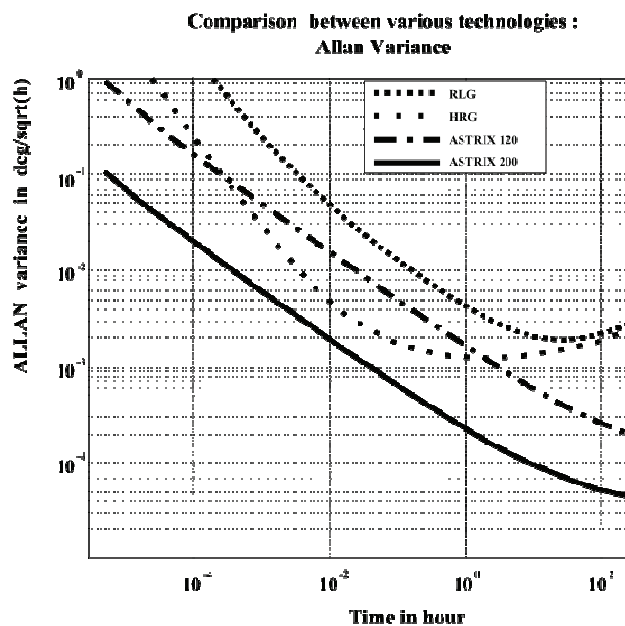


Рис. 3. Сравнение вариации Алана:
вариация Алана, град/√ч; время, ч

Измерения были выполнены компанией EADS-Astrium для внутренних целей, и его результаты были переданы в компанию iXBlue. Вариации Аллана измеряли в течение 300 ч в терморегулируемой среде.

ВТГ достигает минимальной стабильности смещения нуля $1.5 \cdot 10^{-3}$ град/ч за 10 ч, а КЛГ – $2 \cdot 10^{-3}$ град/ч за 60 ч. Обе модели ВОГ не достигли минимального значения за 300 ч. ВОГ с диаметром катушки 200 мм обеспечил СКО на $4 \cdot 10^{-5}$ град/ч после осреднения за 300 ч, все же не достигая минимального значения. Случайный угловой уход ВОГ составляет $2 \cdot 10^{-4}$ град/√ч, в то время как шум КЛГ равен $4 \cdot 10^{-3}$ град/√ч.

Данные результаты долговременных измерений вариации Алана вселили в компанию iXBlue уверенность в возможности реализации долговременной автономной навигации с помощью технологии ВОГ.

Технические проблемы

Первые два параметра, которые необходимо улучшить и привести к нужным значениям в технологии ВОГ, – это шум и долговременная стабильность смещения нуля.

Снижение шума

Гироскоп компании iXBlue FOG 200, используемый в спутниковых навигационных системах, имеет шум $2 \cdot 10^{-4}$ град/ $\sqrt{\text{ч}}$. Как указано выше, необходимо уменьшить это значение в 10 раз. Для начала было проанализировано воздействие разных видов шумов в ВОГ.

Модуляция ВОГ

Как подробно описано в литературе, интерференционный сигнал интерферометра ВОГ является косинусоидальной функцией. Поскольку эта функция не обладает чувствительностью вблизи нуля и не меняет знак вращения, к сигналу ВОГ применяется прямоугольная модуляция (рис. 4). Затем смещенный сигнал измеряется путем демодуляции сигнала детектора. Таким образом, сигнал становится синусоидальной функцией фазового сдвига между двумя встречными оптическими лучами.

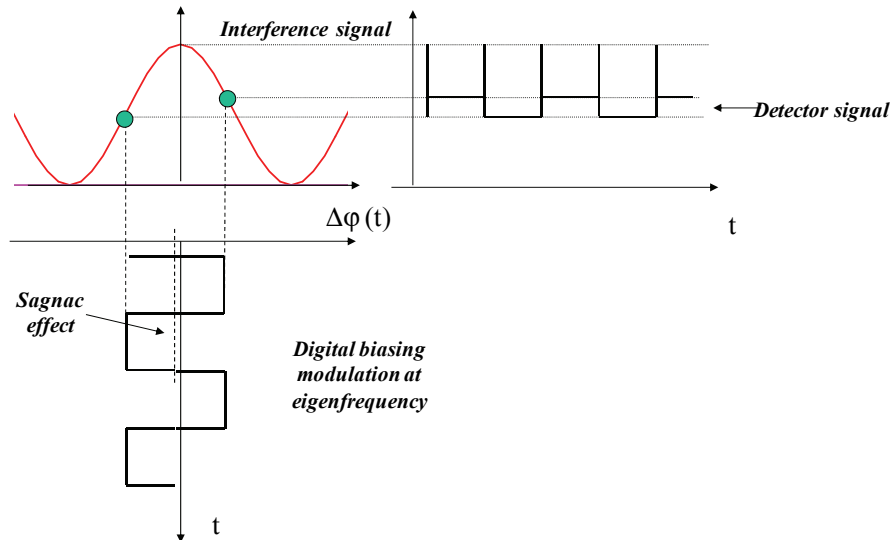


Рис. 4. Прямоугольная модуляция:
Interference signal – интерференционный сигнал; *Detector signal* – сигнал детектора;
Sagnac effect – эффект Саньяка; *Digital biasing modulation at eigenfrequency* –
 цифровая модуляция на собственной частоте

Источники шума

Д р о б о в о й шум (Shot noise) возникает вследствие корпускулярной природы света: он пропорционален квадратному корню из полезной мощности. Дробовой шум – это теоретический минимальный уровень, до которого можно снизить шум.

На рис. 5 показаны:

сигнал – синусоидальная функция коэффициента модуляции (или фазового сдвига);

фактическая оптическая мощность на фотоприемнике, косинусоидальная функция коэффициента модуляции (или фазового сдвига);

дробовой шум, пропорциональный квадратному корню из мощности;

соотношение сигнал/шум, пропорциональное $1/\sqrt{P}$;

соотношение сигнал/шум уменьшающееся по мере увеличения коэффициента модуляции.

Tendency as a function of phase shift (or modulation depth)

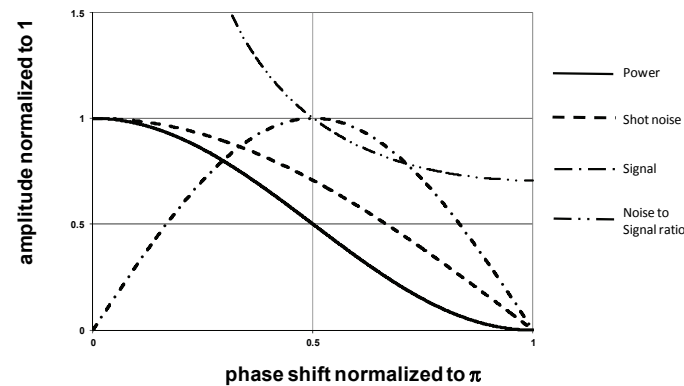


Рис. 5. Дробовой шум:

зависимость как функция фазового сдвига (или коэффициента модуляции)
 ——— мощность, - - - дробовой шум, - - - сигнал, - - - отношение сигнал/шум;
 амплитуда, нормированная к 1; фазовый сдвиг, нормированный к π

Относительная интенсивность шума (Relative Intensity Noise–RIN). Такой шум связан с шириной спектра источника света, которая необходима для устранения паразитных когерентных эффектов, но создает биения между разными импульсами в спектре источника.

Относительная интенсивность шума пропорциональна активной мощности P , поэтому кривые мощности и шума на рис. 6 совпадают.

Tendency as a function of phase shift (or modulation depth)

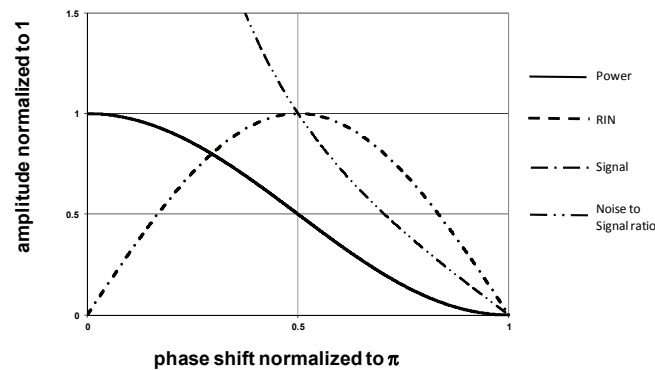


Рис. 6. Относительная интенсивность шума:

зависимость как функция фазового сдвига (или коэффициента модуляции);
 ——— мощность, - - - относительная интенсивность шума, - - - сигнал, - - - сигнал/шум;
 амплитуда, нормированная к 1; фазовый сдвиг, нормированный к π

Отношение сигнал/шум, таким образом, не зависит от мощности. Оно резко снижается при увеличении коэффициента модуляции и достигает нуля при коэффициенте на уровне π . Однако сигнал при этом тоже нулевой, что очень затрудняет измерение! По сути, именно относительная интенсивность шума больше всего ограничивает возможности ВОГ.

Тепловым шум возникает на резисторе трансимпедансного усилителя: сила тока на выходе детектора оптической мощности пропорциональна оптической мощности. Чтобы быть измеренным, ток должен быть преобразован в напряжение с помощью резистора. Тепловое движение электронов производит тепловой шум, который не зависит от активной мощности P .

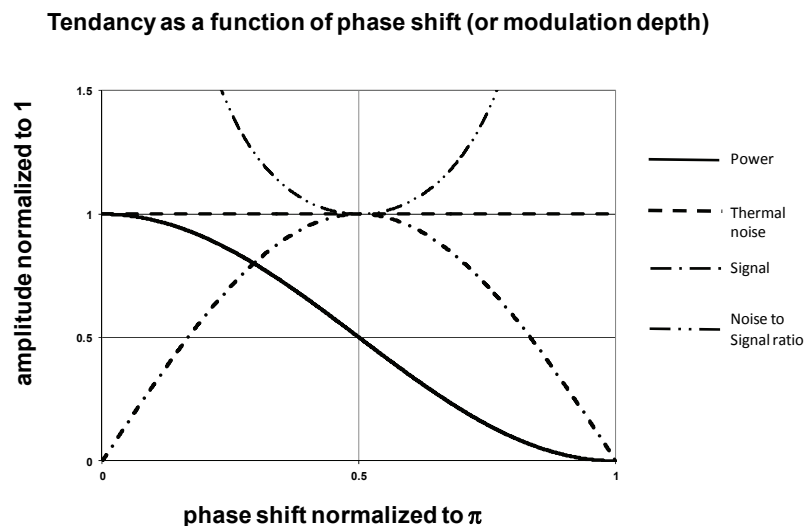


Рис. 7. Тепловой шум:
зависимость как функция фазового сдвига (или коэффициента модуляции)
—— мощность, --- тепловой шум, — — сигнал, — — отношение сигнал/шум;
амплитуда, нормированная к 1; фазовый сдвиг, нормированный к π

Отношение сигнал/шум при этом пропорционально величине $1/P$. На рис. 7 видно, что отношение сигнал/шум минимально при коэффициенте модуляции $\pi/2$ и увеличивается при величине более $\pi/2$.

Другие источники шума. Все три вышеперечисленные источника шума изначально присущи ВОГ. Они вызваны не производственными дефектами, а физическими принципами работы прибора. В ВОГ есть и другие источники шума, связанные с оптическими дефектами или с электроникой. Снизить влияние этих источников можно за счет усовершенствования конструкции или процесса производства.

Оптимизация суммарного шума

Как было сказано выше, при коэффициенте модуляции более $\pi/2$ отношение сигнал/шум уменьшается для дробового шума и шума источника излучения и увеличивается для теплового шума. Поэтому очевидно, что можно оптимизировать уровень шума, правильно выбирая коэффициент модуляции.

Таким образом, проводилась оптимизация оптической мощности, генерируемой источником света и возвращающейся на фотоприемник; коэффициента модуляции; подавление других источников шумов в электронике и паразитных отражений в оптическом пути.

С помощью такой оптимизации был достигнут уровень фазового шума $0,13 \text{ мрад}/\sqrt{\text{Гц}}$ при мощности источника излучения 160 мВт . Этот шум преобразуется в случайный уход по углу ВОГ в соответствии с чувствительностью гироскопа (в зависимости от длины волокна и среднего диаметра катушки). Для гироскопа FOG 120 (длина волокна 1 км), фазовый шум эквивалентен $3,4 \cdot 10^{-4} \text{ град}/\sqrt{\text{ч}}$, для гироскопа FOG 200 (длина волокна – несколько километров) $7 \cdot 10^{-5} \text{ град}/\sqrt{\text{ч}}$.

На рис. 8 видно снижение шума при использовании одной и той же катушки после оптимизации параметров. Шум уменьшается в три раза.

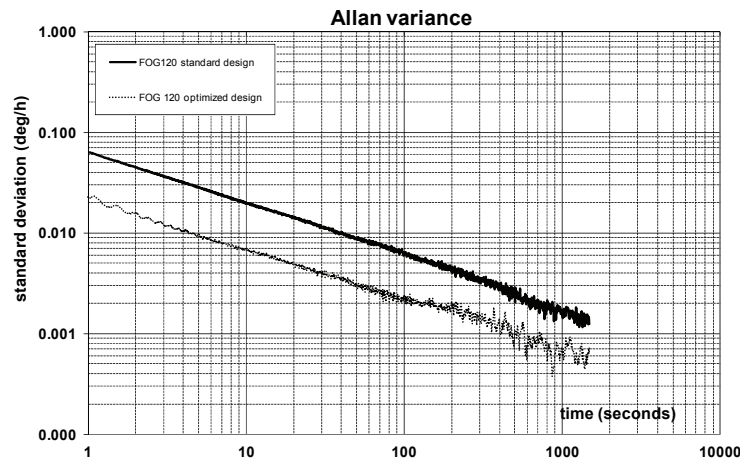


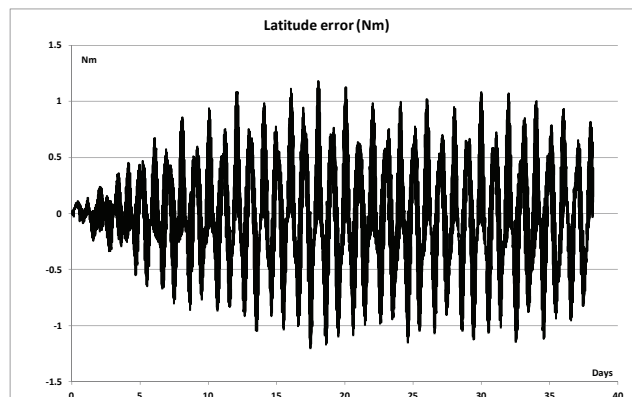
Рис. 8. Снижение шума при использовании одной и той же катушки: вариация Аллана; СКО (град/ч)

Долговременная стабильность смещения нуля

Чтобы определить потенциальные возможности навигации в течение длительного времени с использованием наших датчиков, были проведены испытания модифицированной версии навигационной системы высокой точности. Данные с инерциальных датчиков не записывались, тем не менее по дрейфу широты и долготы за длительный период времени наблюдалась стабильность смещения нуля гироскопов. В частности, линейный дрейф долготы дает хорошую оценку стабильности смещения нуля гироскопа.

Испытываемый прибор был установлен в термокамере, где температура стабилизировалась на уровне 40°C с точностью до $0,2^\circ\text{C}$. После начальной выставки в двух положениях (для калибровки смещений нуля акселерометров и гироскопов с помощью навигационного фильтра Калмана) система работала в инерциальном режиме в течение 38 дней. Полученные результаты – точность определения широты и долготы показаны на рис. 9.

а)



б)

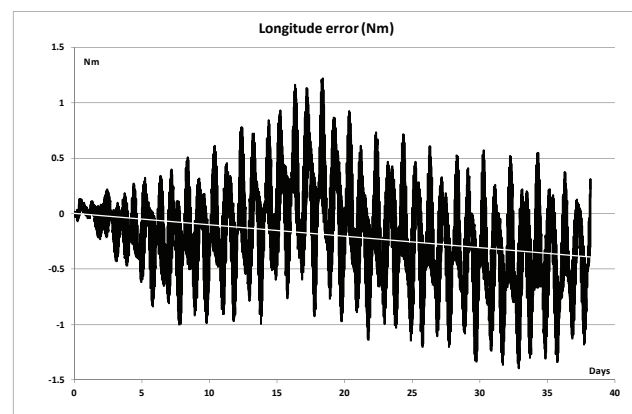


Рис. 9. Погрешность по широте (а) и по долготе (б)

На графике погрешности по широте видно отсутствие линейного компонента дрейфа. Период Шулера модулирует колебания с периодом 24 ч. Это соответствует теории при ситуации, когда смещения нулей гироскопов и акселерометров стабильны во времени.

Что касается долготы, видны колебательные составляющие с периодами 24 ч и 84 мин. Линейный дрейф наблюдается, чего и следовало ожидать в соответствии с теорией. Он составил менее 0,4 морской мили за 38 дней – это менее 0,01 мили или 18 м за день!

Это эквивалентно линейному дрейфу 550 м за месяц. Такой линейный дрейф по долготе эквивалентен менее чем $4,7 \cdot 10^{-6}$ град/ч. Это просто превосходный результат по двум причинам:

1) он означает, что в ходе начальной выставки смещения нуля гироскопа были измерены исключительно точно, по крайней мере с такой же точностью ($4,7 \cdot 10^{-6}$ град/ч);

2) стабильность смещения нуля с момента выставки также соответствует этому диапазону точности.

Никаких конкретных изменений для улучшения стабильности смещения нуля в конструкции ВОГ произведено не было. Разработанная на данный момент конструкция работает настолько эффективно, что смещение нуля отлича-

ется высокой стабильностью во времени. Остаточная чувствительность появляется только под влиянием температуры.

Видно, что суммарная погрешность, включающая составляющие с суточным периодом и с периодом Шулера, близка к ± 1 морской мили в течение 38 дней.

Что остается сделать?

Представленные результаты очень обнадеживают. Было продемонстрировано, что при благоприятных условиях, испытанный инерциальный модуль показал навигационную точность гораздо лучше 1 морской мили в месяц; уровень шума гироскопа и эффективный алгоритм позволяют с большой точностью оценивать смещение нуля гироскопа на этапе выставки.

Однако было бы неверно считать, что мы уже достигли цели (или реализовали нашу мечту, обозначенную в названии статьи). Понятно, что такие результаты были получены в очень стабильных температурных условиях и в статическом режиме, поэтому надо работать над улучшением следующих характеристик гироскопов.

Случайный уход по углу: чтобы сократить время выставки, нужно уменьшить случайный уход еще в 3 раза. С этой целью мы работаем над инновационным решением для дальнейшего снижения относительной интенсивности шума (RIN). В то же время, чтобы увеличить мощность света на уровне фотоприемника, надо работать над улучшением самой катушки с сохраняющим поляризацию волокном, чтобы еще больше снизить затухание. Это позволит использовать катушки с длиной волокна 10 км: такие работы выполняет компания iXFiber – дочерняя компания iXBlue.

Стабильность смещения нуля:

геометрический коэффициент: увеличить соотношение (длина волокна $\times$ диаметр катушки);

точность контроля температуры должна быть проще в реализации: снижение термочувствительности ВОГ, метод намотки и т.д.;

канал ввода-вывода: дальнейшее улучшение коэффициента подавления неосновной поляризационной моды (работы выполняет компания Photline, партнер iXBlue).

Масштабный коэффициент: необходимо добиться улучшения на один порядок:

по этому параметру ВОГ несколько уступает КЛГ. Тем не менее, линейность уже составляет $1 \cdot 10^{-6}$, что доказывает эффективность работы электроники для обработки данных;

на настоящий момент с помощью составления простой температурной модели получена стабильность $1 \cdot 10^{-5}$, но уже существуют решения, обеспечивающие лучшее управление стабильностью геометрии катушки и большую стабильность средней длины волны источника света.

Заключение

Мечта о разработке платформенной навигационной системы с точностью одна морская миля в месяц еще не осуществилась. Но надеемся, нам удалось показать, что это возможно с помощью технологии ВОГ. Несомненно, нужно еще дорабатывать изделия iXBlue, чтобы они достигли такой точности,

но уже сейчас была продемонстрирована точность оценки смещения нуля и стабильность смещения нуля менее $4,7 \cdot 10^{-6}$ град/ч за 38 дней.

Такая точность эквивалентна 4° за столетие! Возможно, именно эта новая единица измерения в будущем станет эталоном для высокоточных навигационных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Post E.J., "Sagnac effect", review of Modern Physics, Vol. 39, 475-494, 1967.
2. H.J. Arditty, P. Graindorge, H.C. Lefèvre, P. Martin, J. Morisse, and P. Simonpiétri, "Fiber-optic gyroscope with all-digital processing", OFS 6, Springer-Verlag Proceedings in Physics, 131-136, 1989.
3. 30th FOG Anniversary Session, OFS 18 Conference, Cancun, 2006.
4. F. Aronowitz, Fundamentals of the Ring Laser Gyro, Optical Gyros and their Application, RTO AGARDograph 339, pp. 3-1 to 3-45, 1999.
5. D.M. Rozelle, "The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets", in Proceedings of the 19th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 1157-1178, 2009.
6. H. Lefèvre., "The Fiber-Optic Gyroscope", Artech House, Boston-London, 1992.
7. Savage P.G., Strapdown Analytics, Strapdown Associates, Maple Plain, Minnesota, 2007.
8. Y. Paturel et al., "MARINS, the first FOG navigation system for submarines" in Proceedings of Symposium Gyro technology, 2006.

Abstract. In 2006, we presented at DGON symposium in Stuttgart [2] the design and navigation results of MARINS, the first FOG-based navigation system within the class of 1 nautical mile per day. This navigation system is now in production and has been delivered to numerous navies.

Today we are challenged by even better performance and the question is: have we reached the limits of the technology or can we still improve the performance of our sensors? One nautical mile in a month means a bias stability of $2 \cdot 10^{-5}$ degrees per hour! It may look foolish for a strapdown system with a dynamic range of at least 100 degrees per second. However, based on tests results, we provide evidence showing that FOG is the right technology to build a fully strapdown INS of this class. In particular we present:

- Noise improvement;
- Very long term pure inertial navigation (several weeks) of a FOG-based system with temperature controlled environment.

Of course, the present FOG design is not good enough for the required performance, even in a strictly controlled environment. The first way to go about this is obviously to increase the geometry factor (and therefore sensitivity) by increasing both diameter and length of the fiber coils, but this will not be sufficient. It will be necessary to improve detection noise, to control more accurately the light source wavelength, to reduce temperature gradient ... Clearly there are difficulties on the way to a FOG-based strapdown system able to navigate with an accuracy of 1 nautical mile over several weeks; however, we show that FOG technology has not reached its ultimate potential yet and that the dream of even higher performance is within reach.

Key words: Fiber Optics Gyro, Navigation, Allan variance