

NovAtel SPAN

Результаты полетного фотограмметрического эксперимента

Авторство NovAtel

Перевод выполнила: Манилова Анна



Данная статья рассматривает, как GPS/INS технологии SPAN фирмы NovAtel могут быть применены в аэрофотограмметрии, а также описывает преимущества программного пакета Inertial Explorer, который обеспечивает возможность пост-обработки. Лётные испытания проводились с использованием Northrop Grumman LN200IMU, который является одним из четырех типов IMU, используемых в системе SPAN. Относительная точность определялась путем сравнения

с результатами аэотригуляции (АТ). Точность определения координат наземных пунктов определялась путем сравнения с координатами опорных пунктов. Хотя эта статья в первую очередь касается фотограмметрического приложения, пользователи LiDara могут рассчитывать на подобный уровень точности.

Тест-обзор

Этот полет был предпринят для того, чтобы продемонстрировать, как поток данных проходит через систему SPAN фирмы NovAtel и программное обеспечение Inertial Explorer фирмы Waypoint, результаты вычислений с использованием которых являются завершением съемочного полета. Для этого испытания аппаратура SPAN интегрировалась в систему камер. Затем камера была установлена внутри самолета. Данные собирались в течение 2-х рейсов, в разные дни. Собранные данные состояли из необработанных GPS-измерений, сырых данных Инерциального Блока Измерений, SPAN GPS/INS

решения в режиме реального времени, времени экспозиции камеры и фото-экспозиции. Изображения получены в цифровом виде с использованием программного продукта BAE Socket Set. С использованием наземных опорных пунктов из данных первого рейса и углов визирования была вычислена внутренняя ориентировка при помощи программного обеспечения. Затем эти углы визирования использовались как данные для 2-го дня полета, чтобы оценить точность инерциального навигационного решения системы SPAN и Inertial Explorer. Относительная точность и точность определения наземных координат анализируется в заключительном разделе.

Обзор оборудования

Технология SPAN фирмы NovAtel была использована для сбора данных GPS и Инерциального Блока Измерений во время полетных заданий. Обработка сырых данных делалась с использованием программного пакета Inertial Explorer фирмы Waypoint. Следующие две компоненты обеспечивают полное GPS/INS решение:

1. Высокое качество решения в режиме реального времени с улучшенным сигналом слежения, возможность эффективно и одновременно регистрировать сырые данные.
2. Мощный программный пакет обработки данных, который включает прямую и обратную обработку, угол визирования и более сглаженное решение.

Алгоритм “тесное соединение” в системе SPAN выполняет взаимную помощь между GPS-системой и Инерциальной Навигационной Системой. Это приводит к значительному улучшению повторного сигнала и возможности полного решения в приемнике или в последующем программном обеспечении. После провала сигнала система SPAN восстанавливает потерянные GPS-сигналы менее чем за 2 секунды в 95% случаев. Это значительно быстрее, чем автономный GPS-приемник, который за 11 секунд восстанавливает все GPS-сигналы в 95% случаев.

Система SPAN и ПО Inertial Explorer также используют информацию GPS-системы в области измерений, используя измерения несущей фазы для помощи фильтра Инерциальной Навигационной Системы, всякий раз, когда обновления положения области измерений не доступны или сомнительного

качества. Эта функция эффективна при виражах в полете или на земле в городских условиях.

В настоящее время система SPAN поддерживает 4 класса Инерциального Блока Измерений на выбор:

1. Northrop Grumman LN 200
2. Honeywell HG1700 AG58
3. Honeywell HG1700 AG62
4. iMAR FSAS

Упомянутый в данной статье LN 200INU – был использован для съемки и является Инерциальным Блоком Измерений, на которую опирается эта статья.

Test Set-up

Рис.1 Установка

Ссылка и описание

1. Приемник ProPak-V3, подключенный к компьютеру для передачи данных
2. ГНСС-антенна
3. Кабель для Ln-200 и IMU
4. Питание:
 - 9-18 В для ProPak-V3 SPAN
 - 9-18 В для ProPak-V3 base
 - 12-28 В для IMU LN-200
5. Камера
6. Базовая станция (приемник серии OEMV)
7. Ноутбук

Рис.2 CDU во время записи данных

Рис.3 Пример графика в Inertial Explorer

КОМПОНЕНТЫ SPAN: СБОР ДАННЫХ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ И ПОЛУЧЕНИЕ НАВИГАЦИОННОГО РЕШЕНИЯ

Для одного пункта, в режиме реального времени, связь между базовой и роверной станциями не требуется. Как все приемники OEMV, приемник SPAN может принимать SBAS-корректоры для лучшей точности положения одного пункта. В пост-обработке, Inertial Explorer предлагает режим PPP (точный момент положения), а также может принять SBAS-траекторию для помощи в обработке Инерциальным Блоком Измерений. Конфигурация в системе SPAN (то есть GPS-система относительно смещений Инерциального Блока Измерений, SBAS конфигурация) и регистрация данных может быть осуществлена через программное обеспечение CDU NovAtel. Захват экрана CDU во время регистрации данных показан выше на рис. 2.

WAYPOINT INERTIAL EXPLORER: ПОСТ-ОБРАБОТКА

Inertial Explorer является продолжением популярного программного обеспечения GrafNav, разработанного для ГНСС пост-обработки. GrafNav является программой для высокоточной пост-обработки ГНСС, поддерживая несколько базовых станций и показывающий очень надежный режим “в полете” и “кинематическое разрешение неоднозначности” на больших расстояниях. Данные ГНСС могут быть обработаны в прямом и обратном направлениях, и в их сочетании для обеспечения оптимального решения. Обработка ГНСС и инерциальных данных имеют один и тот же пользовательский интерфейс. Inertial Explorer поддерживает данные SPAN, автоматически распознавая формат данных и имея определенную модель ошибок для каждой системы SPAN, которые распознает Инерциальный Блок Измерений. Режим РТС-сглаживания осуществляется путем предложения оптимизации минимальных ошибок во время ГНСС-отключений.

Режим карты функционально встроен со многими аналитическими инструментами, чтобы помочь вам подтвердить качество ваших результатов. Например, вы можете наносить невязки GPS/INS или узнать разницу между прямым и обратным решениями. Многие люди считают, что разделение участков на прямое и обратное направления полезно, для того чтобы убедиться, что получено хорошее решение. Если существуют серьезные различия или тенденции при разделении на прямое и обратное направления, то это может указывать на проблемы с обработкой, такие как неверное смещение вектора Инерциального Блока Измерений относительно GPS или плохие первоначальные условия уравнивания. Рисунок 3 на стр. 2 показывает

пример разделения на прямое и обратное направления в области координат экспортируемые из Inertial Explorer.

ИНТЕГРАЦИОННАЯ СИСТЕМА ВНУТРИ БОРТОВОЙ КАМЕРЫ

Чтобы продемонстрировать эффективность системы SPAN и ПО Inertial Explorer для аэрофотограмметрического приложения, были собраны аэрофотограмметрические данные. Карты LN200 и SDLC устанавливались на литом конусообразном объективе LMK-камеры, в нескольких сантиметрах от оптического центра камеры. Увидеть изображение установки можно ниже. Кабели питания и кабели для передачи данных, которые видны в верхнем левом углу изображения, были вставлены через существующие отверстия люка. Кабель для передачи данных подключался к OEMV-3, а силовой кабель был подключен к 28В источнику постоянного тока. LMK-камера помещалась внутрь и закреплялась как показано на рисунке ниже (бортовая камера - на фото на переднем плане).



Время, генерируемое в журнале MARKTIME, было коррелируемо с выводом системы управления полетов, назначая правильное аннотированное фото идентифицированное для каждого события. Система SPAN настраивалась на вывод навигационного решения в режиме реального времени с частотой 10 Гц, сырые инерциальные данные передавались на полную скорость с частотой 200 Гц, а GPS псевдодальности и данные фазовых измерений с частотой 1 Гц.

Методика испытаний

Обзор

Испытательные полеты проводились в окрестностях Торонто, Онтарио, Канада.

Было сделано 2-а рейса в разные дни. Первый день полетов был использован для расчета углов визирования. Второй день полетов использовался для оценки точности инерциального навигационного решения, с применением углов визирования (которые были определены в первый день полета). Высота полета составляла 900 метров, выдаваемое фото было в масштабе 1:6000. На 6-и фотографиях были определены контрольные точки, которые использовались для сравнения с наземными опорными пунктами. На рисунке 4, ниже, показана схема полета, фото пунктов и контрольные точки.

Как и все OEMV приемники фирмы NovAtel, система SPAN может получать SBAS корректеры (WAAS, EGNOS, Omni STAR, CDGPS) для повышения точности более чем одной точки позиционирования.

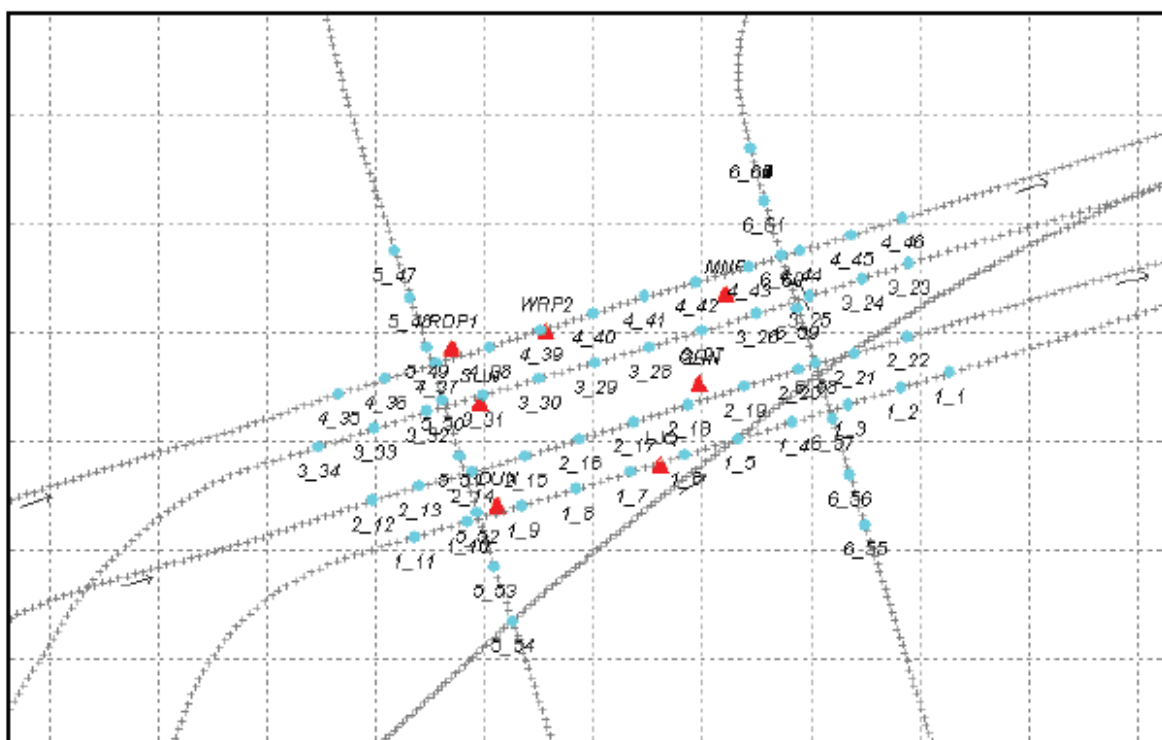


Рис.4: Схема полета, точки, определенные по фотографиям (голубые круги) и наземные контрольные точки (красные треугольники).

Методика испытаний

Рабочий процесс

Бортовые картографические приложения обычно имеют дело с очень большим объемом данных, а многочисленные проекты обрабатываются за

короткие промежутки времени. Поэтому рабочий процесс требуется оптимизировать. Inertial Explorer ориентирован для данного приложения. Многие годы развития ушли на оптимальную обработку потока данных, которая показана на рисунке 5.

В режиме реального времени бортовая камера уведомляет систему SPAN о времени каждой средней экспозиции. Система управления полетами тоже используется, но это здесь не показано.

После того как полет завершен, начинают обработку данных с использованием ПО Inertial Explorer (показано справа на схеме). В процессе работы сырые данные Инерциального Блока Измерений и GPS-данные декодируются в формат файла Waypoint, используя преобразователь GPS-данных. На данном этапе данные базовой станции должны быть преобразованы, или загружены из Интернета. Для GPS обработки должны быть известны координаты базовой станции, модель антенны и обработанный профиль. После этой обработки прямая и обратная траектории автоматически объединяются. В этот момент оператору рекомендуется пересмотреть позиционное разделение между прямой и обратной траекториями.

Для обработки инерциальной системы вектор направления Инерциального Блока Измерений к ГНСС-антенне должен быть зафиксирован. Статические данные собираются несколько минут в начале и в конце съемки для того, чтобы запустить процесс статического приближенного уравнивания в прямом и обратном направлениях. Кинематическое уравнивание может быть получено в любом направлении, если выбрать подходящие начальное/конечное время обработки, которое будет соответствовать прямому ровному отрезку полета. Затем обрабатываются оба направления. Из сглаженных конечных результатов получается траектория, которая содержит координаты, скорость и элементы ориентирования, частота выдачи которых равняется 200 Гц.

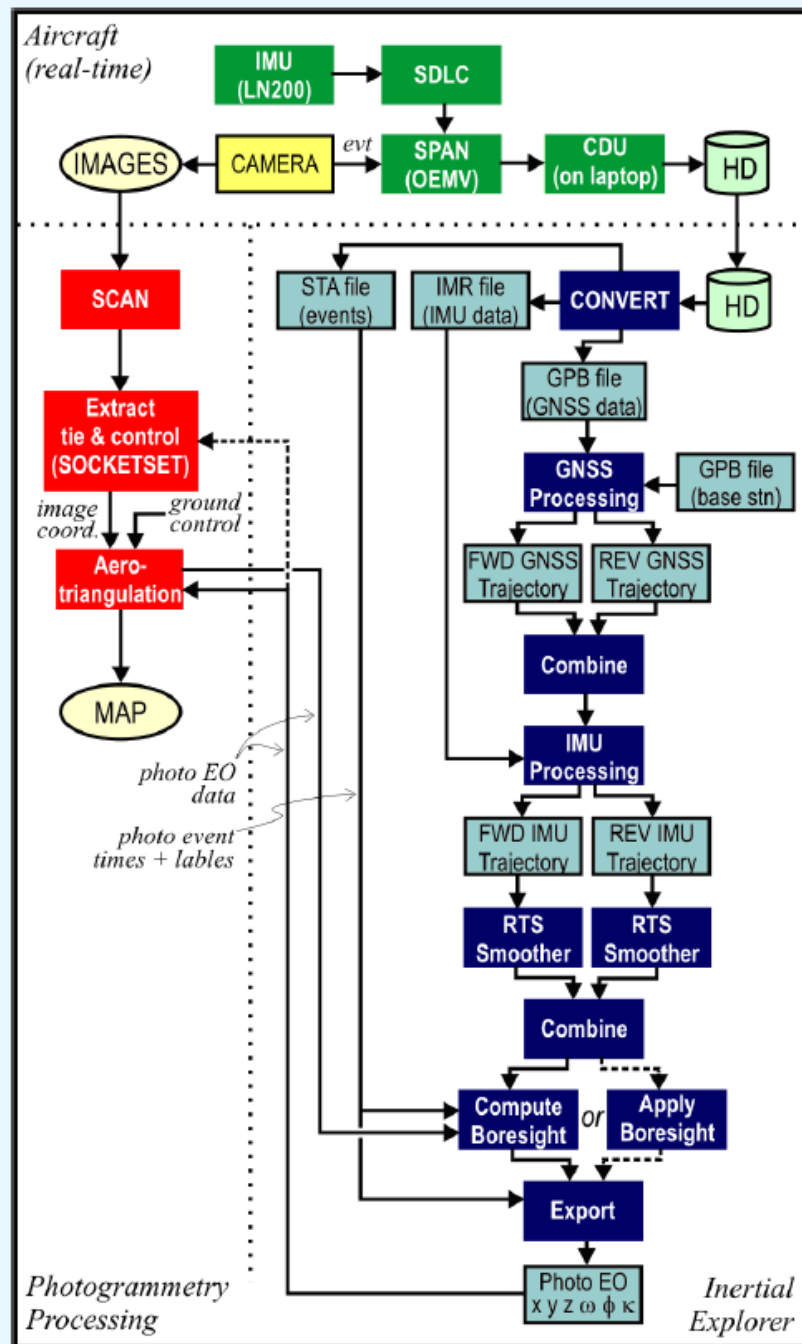


Рис.5: Схема работы при аэрофотосъемке с использованием Inertial Explorer и SPAN

В то время как навигационные данные были обработаны, аэротриангуляционные точки были извлечены из цифрового изображения с помощью программного обеспечения BAE Socket Set (показано на рисунке 5 в нижнем правом углу). Автокорреляция была зашумлена сильнее, чем обычно, благодаря использованию более высокой скорости пленки, которая в результате приводит к зернистому изображению. Высокая скорость пленки выбиралась для того, чтобы земля хорошо была видна в плотной городской

застройке. Изображенные ниже фотографии были сделаны из кабины самолета во время аэрофотосъемки.

Методика испытаний

Сравнительные элементы решений

Для сравнения определяют элементы фотограмметрии и элементы, предусмотренные инерциальным навигационным решением, для этого требуется хоть какая-нибудь промежуточная обработка данных. Инерциальное навигационное решение - это определение крена, тангажа и рыскания. Фотограмметрическая система использует углы ω , ϕ , κ . Эти две угловые системы имеют несколько отличий, которые обозначены на рисунке 6.

Углы ω , ϕ , κ описывают положение камеры относительно приемника, а углы крен, тангаж, рысканье описывают вращение самолета относительно земли. В фотограмметрической системе, как правило, применяются углы ω , ϕ , κ , хотя углы крена, тангажа, рысканья также могут быть использованы. В системе SPAN и Inertial Explorer углы крена, тангажа, рысканья определенным образом развернуты, сначала вокруг оси z , затем x и потом y . Угол сближения меридианов учитывается в углах ω , ϕ , κ , так как они, как правило, привязаны к северу сетки (карты), а не к истинному северу. Инерциальное навигационное решение, то есть углы крена, тангажа, рысканья, связаны с эллипсоидальной высотой, в то время как ω , ϕ , κ отсчитывают решение от геоида. Для учета геодезических предположений об однородном поле тяжести, используются отклонения по вертикали. Углы ω , ϕ , κ задают ориентировку камеры, а углы крена, тангажа, рысканья задают ориентировку Инерциального Блока Измерений. Для сравнения углов ω , ϕ , κ и углов крена, тангажа и рысканья применяются углы визирования. Наконец, система ω , ϕ , κ используют систему координат с x , направленным вперед, y - влево, z - вверх, тогда как система крен, тангажа, рысканья используют систему координат с x - вправо, y - назад и z - вверх.

Это довольно сложное преобразование осуществлялось в специальном модуле Inertial Explorer – boresighting. Для этого преобразования единственное, что требовалось, – сетевая система управления и проверка углов ω , ϕ , κ , которые нужны системе для того, чтобы на выходе получить обработанное изображение. После того как были учтены все расхождения между углами ω , ϕ , κ и креном, тангажом, рысканьем,

было произведено сравнение. Были предприняты специальные меры, чтобы во время обработки декорелятора уравнивались координаты с элементами ориентировки. Для этого используются небольшие стандартные поправки в GPS-координаты. После того как стало ясно, что элементам ориентирования из Инерциального Блока Измерений не помогла аэротриангуляция, назначались очень большие поправки в углы Инерциального Блока Измерений.

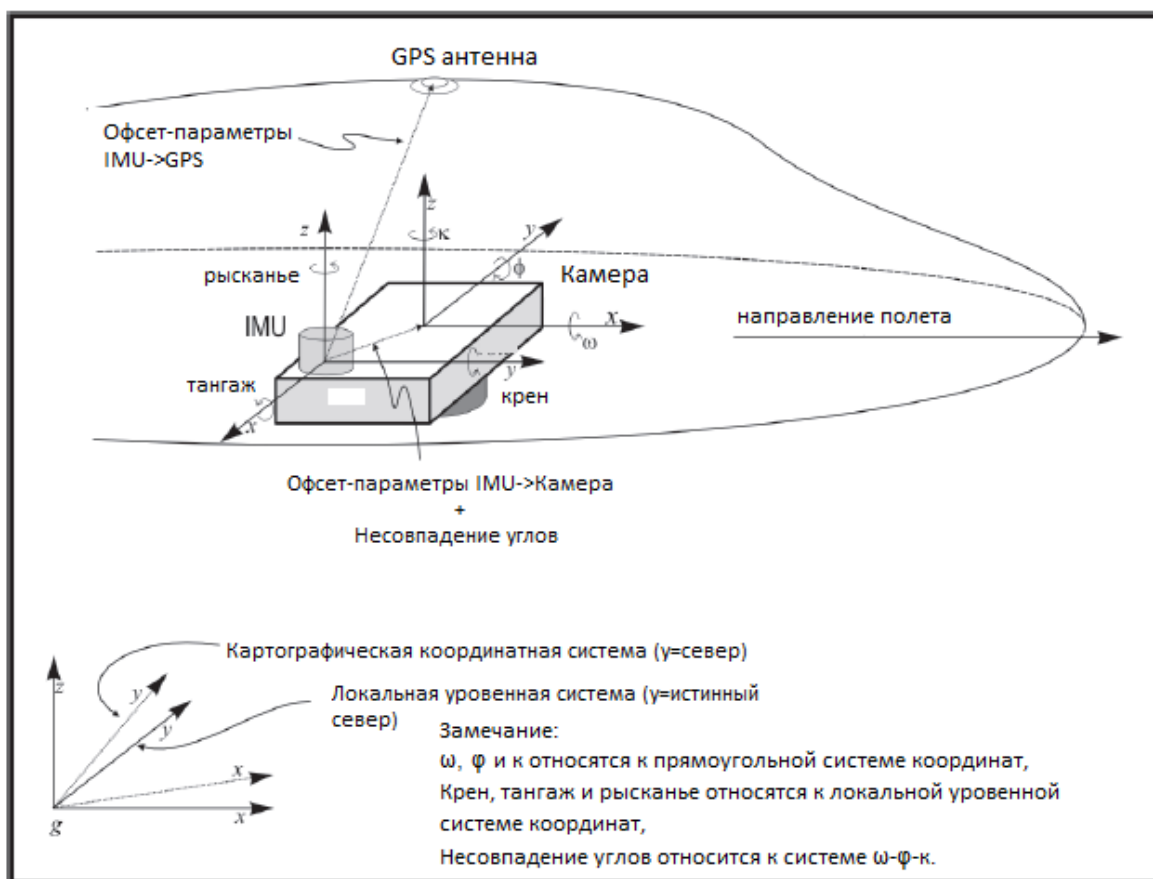


Рис.6: Отношение используемых систем координат

Оценка наземных координат

Вычисления координат были сделаны в UTM зоне 17. Координаты, предоставляемые Inertial Explorer, компенсировались по высоте, учитывая масштаб карты. Это необходимо, потому что горизонтальные координаты увеличены на одну и ту же величину.

Из-за температуры и тропосферного эффекта может иметь место остаточное влияния смещения курса по высоте. Для этих данных корреляция смещения составила 14 см за два дня. Удаление смещения по высоте является важным аспектом обработки данной методики. Для оценки наземных

измерений, положения изображения и элементов ориентирования используются данные, которые определяются наилучшим образом из GPS и Инерциального Блока Измерений, чем с помощью фотограмметрии. Ошибки наземных измерений - это комбинация внешнего ориентирования и ошибка отдельной измеренной точки. Следовательно, связующие точки не использовались для уточнения внешнего ориентирования.

Наземные опорные пункты используются в частном порядке для сохранения и контроля сети. Точность таких координат порядка см, но такие цели здесь не были поставлены. По этой причине у этих фото-идентифицируемых опорных точек высотная составляющая будет более точной, чем горизонтальная составляющая. Ошибка при выборе места для опорных наземных пунктов на изображении не приведет к большой вертикальной погрешности из-за небольшого топографического перепада в области контрольной точки.

Бортовые картографические приложения требуют хорошо моделированного рабочего процесса. Inertial Explorer очень сильно ориентирован на это приложение и многие годы ушли на развитие оптимальной обработки потока данных.

Результаты испытаний

Оценка элементов

Взаимная связь между фотограмметрическими определяемыми элементами и элементами решения, которые получаются в результате работы системы SPAN и ПО Inertial Explorer, представлены в таблице 1 и 2. Углы визирования вычислялись с помощью данных, полученных в 1-ый день и эти же углы визирования использовались для корректировки данных во 2-ой день.

Оценка наземных опорных пунктов

Взаимная связь между координатами наземных опорных пунктов и координатами точек, изображенных на фото и определенных в Inertial Explorer, представлены в таблице 3 и 4.

Контроль качества

Inertial Explorer предоставляет 2 способа для оценки качества съемки: стандартное сообщение об отключениях и происходящее RMS-разделение между прямой и обратной обработками. Разделение возможно для координат,

скоростей и элементов ориентирования. В результате анализа выяснилось, что наибольшую неоднозначность вызывает разделение элементов ориентирования. Разделение координат является более значимым в анализе GPS-решения. Элементы разделений RMS вычисляются как разность между прямой и обратной траекториями. Дисперсия - это разность сумм дисперсий в прямой и обратной траекториях. Поэтому разделение RMS на прямую и обратную траектории является пессимистической мерой для дисперсии в окончательном варианте траекторий, представленных в Inertial Explorer. Таблицы 5 и 6, сообщают об этих мерах в пространственных углах крена, тангажа, рысканья в 1-ый день и во 2-ой день соответственно. Для удобства, ω , ϕ , κ – это разность фотограмметрических оценок, повторяющихся в таблице 7.

Таблица 1: Разница между положением, вычисленным по фотограмметрическим данным и по инерциальным данным

Средство инерциального решения	Углы омега (градусы)	Углы фи (градусы)	Углы каппа (градусы)
Inertial Explorer	15.0 (0.004)	16.2 (0.005)	15.1 (0.004)
SPAN Single Point	21.9 (0.008)	20.1 (0.008)	74.9 (0.027)
SPAN RTK	18.3 (0.005)	37.5 (0.010)	63.0 (0.018)

Таблица 2: Разница между положением, вычисленным по фотограмметрическим данным и по инерциальным данным (день 2)

Средство инерциального решения	Углы омега (градусы)	Углы фи (градусы)	Углы каппа (градусы)
Inertial Explorer	16.6 (0.005)	10.8 (0.003)	24.3 (0.007)
SPAN Single Point	20.9 (0.006)	34.1 (0.009)	59.2 (0.016)
SPAN RTK	20.6 (0.006)	40.3 (0.011)	42.8 (0.012)

Таблица 3: Разница между опубликованными координатами и координатами, полученными по фотограмметрическим данным

Название контрольной точки	Ошибка по северу (м)	Ошибка по востоку (м)	Ошибка по высоте (м)
DUN	0.091	0.094	0.042
GRN	0.079	-0.099	0.214
LJQ	0.375	-0.344	-0.108
MNP	-0.035	0.032	-0.089
RDP1	-0.028	0.031	0.005
SUN	-0.011	-0.097	-0.010
WRP2	0.066	0.150	0.013
RMS	0.152	0.156	0.098

Таблица 4: Разница между опубликованными координатами и координатами, полученными по фотограмметрическим данным (день 2)

Название контрольной точки	Ошибка по северу (м)	Ошибка по востоку (м)	Ошибка по высоте (м)
DUN	0.009	0.038	-0.150
GRN	-0.139	0.072	-0.062
LJQ	-0.213	-0.088	-0.008
MNP	-0.145	0.166	-0.067
RDP1	0.029	-0.076	0.081
SUN	0.073	-0.316	0.151
WRP2	-0.103	0.051	0.099
RMS	0.121	0.146	0.100

Обсуждение

Относительные результаты представляют интерес, поскольку фотограмметрическая система ошибок непосредственно связана с ошибками положения камеры и отношений. В данном случае результаты 2-го дня показывают разности омега (крен) и фи (тангажа) равными 17 и 11 угловых секунд соответственно. Эти соотношения являются очень хорошими, учитывая, что получены они фотограмметрическим методом, также отношения имеют ошибки из-за измерения шума. При условии, что это реальная точность, значения можно перевести в фотограмметрическое изображение с ошибками 7-12 мм. В это время в таком масштабе относительный вклад ошибок в горизонтальной плоскости будет составлять 5-8 см. Значение высоты будет и дальше ухудшаться из-за геометрии спутников. Разница каппа (которая является приблизительным направлением) является достаточно большой и равняется 24 угловым секундам. В масштабе фото, максимальная погрешность составляет 12 мм, которые будут трансформироваться в 7.2 см. В 1-й день показаны похожие точности и происходит дальнейшая закономерность укрепления этих оценок. Это было ожидаемо, видя наземные контрольные ошибки, отражающие приведенные выше результаты. Примерно так же и по высоте наблюдалась не очень хорошая точность. Была пара выбросов измерений в оба дня, но не имеющая влияния на реальные модели. Наземный опорный пункт ID SUN (смотри таблицу 4) был сильно затемнен во 2-ой день. Бортовой GPS-приемник, как правило, не имеет точность лучше, чем 5 см. Следовательно, эти значения являются типичными, учитывая участие всех источников ошибок.

Горизонтальные ошибки больше исключительно из-за того, что использовался контроль идентифицируемых фото. Точка LJQ была худшим показателем за два дня и у фотограмметрического оператора были проблемы по размещению таких точек на снимках. Во второй день пункт SUN был снова затемнен. Как правило, по сравнению с другими пунктами это довольно хорошие результаты и RMS отношения были порядка 10 см, в которых провалы удалены. Хотя многие приложения не используют решение в режиме реального времени, относительная точность, предоставляемая системой SPAN в режиме реального времени представлена в таблице 1 и 2 и используется для проверки точности решения с внешнего управления. Эта точность, доступная в режиме реального времени, может быть ценной и для первоначальной проверки качества участка.

Таблица 5: Контроль качества (день 1)

	Крен (угловые секунды)	Тангаж (угловые секунды)	Направление (угловые секунды)
Среднее стандартное отклонение на фотоснимках	13.0 (0.004)	13.3 (0.004)	34.2 (0.010)
СКО сравнения прямого и обратного решения	20.2 (0.006)	29.2 (0.008)	50.0 (0.014)

Таблица 6: Контроль качества (день 2)

	Крен (угловые секунды)	Тангаж (угловые секунды)	Направление (угловые секунды)
Среднее стандартное отклонение на фотоснимках	13.0 (0.004)	13.0 (0.004)	32.4 (0.009)
СКО сравнения прямого и обратного решения	20.2 (0.005)	29.2 (0.008)	50.0 (0.014)

Таблица 7: Разница между положением, вычисленным по фотограмметрическим и по инерциальным данным, вычисленным с помощью Inertial Explorer

	Углы омега (градусы)	Углы фи (градусы)	Углы каппа (градусы)
День 1	15.0(0.004)	16.2 (0.005)	15.1 (0.004)
День 2	16.6 (0.005)	10.8 (0.003)	24.3 (0.007)

Заключение

Система и Inertial Explorer фирмы NovAtel удовлетворяет аэрофотограмметрическим требованиям. Оба эти продукта могут быть интегрированы в аэрофотосъемочный процесс. Благодаря несложной аппаратной структуре, систему SPAN очень легко устанавливать в большинство бортовых картографических оборудований, находящихся на борту самолета. Возможности пост-обработки в Inertial Explorer доступны в его удобном для пользователя интерфейсе windows. Также он может быть автоматизирован для конкретного рабочего процесса с API-интерфейсом.