

ВОЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ЗНАЧЕНИЕ МЕСТНОЙ КИТАЙСКОЙ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Джеффри Форден

Китай вывел на орбиту группировку из трех спутников для космической навигации, известную под названием Бейдоу. В этой статье геометрия группировки, определенная системой слежения за космическим пространством НОРАД и открыто доступная из НАСА, используется для оценки точности, доступной пользователю системы Бейдоу. Ограниченная по покрытию земной поверхности примерно азиатским субконтинентом, эта система требует от пользователя либо проходить через итерационный процесс, плохо приспособленный для большинства военных применений, либо предоставлять свой собственный стандарт времени, имея при себе часы высокой точности. Итерационный метод предоставляет точность, сравнимую с точностью системы НАВСТАР/GPS на ограниченном участке Земли. Однако, применение атомных часов позволяет использовать систему в режиме, который может предоставить достаточную точность для применения на разделяющихся боеголовках китайских МБР на пути в Соединенные Штаты и достичь значительного улучшения точности. Удивительно, что эти режимы работы не обеспечивают достаточной точности для большинства обычных военных пользователей.

Статья получена 14 января 2004 г. и принята к публикации 30 апреля 2004 г.

Автор работает в Массачусетском технологическом институте.

Посылать корреспонденцию по адресу: Geoffrey Forden, Massachusetts Institute of Technology, Building E28-620, 292 Main St., Cambridge, MA 02139.

Электронный адрес: forden@MIT.EDU

ВВЕДЕНИЕ

Мир знаком со спутниковыми навигационными системами, которые обеспечивают глобальный охват и доступ с помощью недорогих терминалов. Эти системы, представителем которых является американская система НАВСТАР/GPS, включают более 20 спутников на околоземных орбитах средней высоты с наклоном около 54 градусов¹. Поэтому стало несколько удивительным, что Китай вывел на орбиту очевидно региональную систему – навигационную систему Бейдоу – основанную на двух, или, возможно, трех геостационарных спутниках (обсуждаемая ниже объявленная Китаем концепция базируется на двух спутниках, в то время как на веб-сайте Китайского космического агентства² говорится, что третий спутник, запущенный 24 мая 2003 года, завершает группировку).

Китай объявил³, что его космическая система будет использоваться для гражданских целей, таких, как «поддержка автомобильного и железнодорожного транспорта и прибрежных операций». Представленный здесь анализ показывает, что существующая орбитальная система, работающая в объявленном Китаем режиме, может предоставить таким пользователям оценки широты и долготы, сравнимые с данными НАВСТАР/GPS, но только если положение пользователей рассчитывается при помощи довольно сложной итерационной процедуры, которая предполагает знание высоты. Однако, пользователь может ретранслировать радиосигнал на спутник и центр управления может рассчитать его новое положение. Такая радиопередача может выдать положение пользователя и поэтому представляется

¹ J. J. Spilker Jr. and Bradford W. Parkinson, Overview of GPS Operation and Design, in Bradford W., Parkinson and James J. Spilker Jr. (eds.), *Global Position System: Theory and Applications, Volume 1* (Washington D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996).

² 2 января 2004 г. этот веб-сайт находился по адресу <http://www.cast.ac.cn/en/printpage.asp?ArticleID=36>

³ Там же.

малопригодной для большинства военных применений⁴.

Точность навигационной системы оказывает прямое воздействие на применения системы и может позволить аналитику независимо оценить, как может быть использована система. В этой статье анализируются точности, который может ожидать пользователь от системы Бейдоу в различных режимах, с особым вниманием к военным применениям.

В следующих разделах рассматривается история запуска и поддержания орбит системы Бейдоу, за которой следует обсуждение объявленной Китаем концепции ее работы. В следующем разделе представлена математическая база, необходимая для расчета точности системы, в которой используется меньше четырех спутников. Более полный обзор требующейся математической базы приводится в Приложении в конце статьи. На этом основании в следующем разделе анализируется точность, которой можно ожидать, используя объявленную Китаем концепцию использования. В последующих разделах анализируется точность, связанная с различными режимами работы системы.

Несмотря на то, что эти режимы работы отличаются от объявленного, они могут быть использованы с имеющимися космическими средствами. Кроме того, эти режимы работы могут быть более удобными для многих военных применений, поскольку пользователь остается пассивным и не посылает сигнал назад на спутник, что потенциально раскрывает его расположение. Однако, результаты показывают, что эти режимы работы не позволяют достичь точности, сравнимой с точностью NAVSTAR/GPS для обычных военных пользователей. Удивительно, но система Бейдоу может существенно повысить точность китайских МБР, в особенности, если Китай модернизирует свои МБР индивидуально наводящимися боеголовками, как предполагают некоторые аналитики.

Табл. 1. Параметры группировки Бейдоу.

| Название спутника | Номер по каталогу НОРАД | Дата запуска | Долгота (в градусах) | Наклонение (в градусах) | Апогей (в км) | Перигей (в км) |
|-------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|-------------------------|---------------|----------------|
| Бейдоу 1А | 26599 | 30 окт. 2000 г. | 139,9 | 0,05 | 35 804 | 35 770 |
| Бейдоу 1В | 26643 | 20 дек. 2000 г. | 80,2 | 0,07 | 35 801 | 35 773 |
| Бейдоу 1С | 27813 | 24 мая 2003 г. | 110,4 | 0,15 | 35 829 | 35 747 |

ГРУППИРОВКА БЕЙДОУ

История запусков и текущие⁵ орбитальные параметры трех спутников Бейдоу приведены в табл. 1. Два первых спутника были выведены на орбиту в конце 2000 г., первый в октябре, а второй – в декабре. После этого Китай подождал примерно 2,5 года, прежде, чем вывести третий спутник. В течение этого периода Китай осуществлял операции по поддержанию орбиты каждого из этих спутников. На рис. 1 показана история изменения долготы трех этих спутников и области земной поверхности, с которых они видимы. Пересечение всех трех овалов является областью земной поверхности, на которой пользователь может применять систему. Эта область простирается примерно от восточной оконечности Аравийского полуострова до восточной оконечности Австралии. Эта система, очевидно, является региональной для наземного использования.

Китай поддерживал довольно хорошие записи поддержания орбиты всех трех спутников. На рис. 2 показаны детали изменения долготы спутника Бейдоу 1А. На нем показан типичный профиль поддержания орбиты геостационарного спутника; каждые 30 суток или около

⁴ Некоторые аналитики заявляют, что этот режим может быть использован китайскими военными для привязки пунктов запуска их мобильных МБР следующего поколения (Дэвид Райт, частное сообщение). Конечно, мобильные пусковые установки могут находиться и на заранее привязанных пусковых позициях.

⁵ Информация в таблице 1 и фактически все расчеты этой статьи, основанные на орбитальных положениях, определена из информации, предоставляемой на веб-сайте группы орбитальной информации НАСА (<http://oig.gsfc.nasa.gov/>) и базируется на эфемеридах 31 декабря 2003 г.

этого включается ракетный двигатель спутника для того, чтобы предотвратить дрейф спутника от своего положения – эффект, который вызывается небольшими нерегулярностями гравитационного поля Земли. На рисунке эти включения соответствуют моментам резкого изменения долготы, в этом случае, при низких значениях долготы, или выступам на графиках частоты. После включения двигателя спутник перемещается к локальному максимуму гравитационного потенциала, прежде чем начать возвращаться назад вдоль того же самого наклона, после чего снова повторяется процесс коррекции орбиты. Китай большую часть времени поддерживал долготу в интервале $\pm 0,1$ градуса, как это рекомендуется Международным союзом телекоммуникаций. Аналогичное поддержание орбиты производить и для двух других спутников Бейдоу.

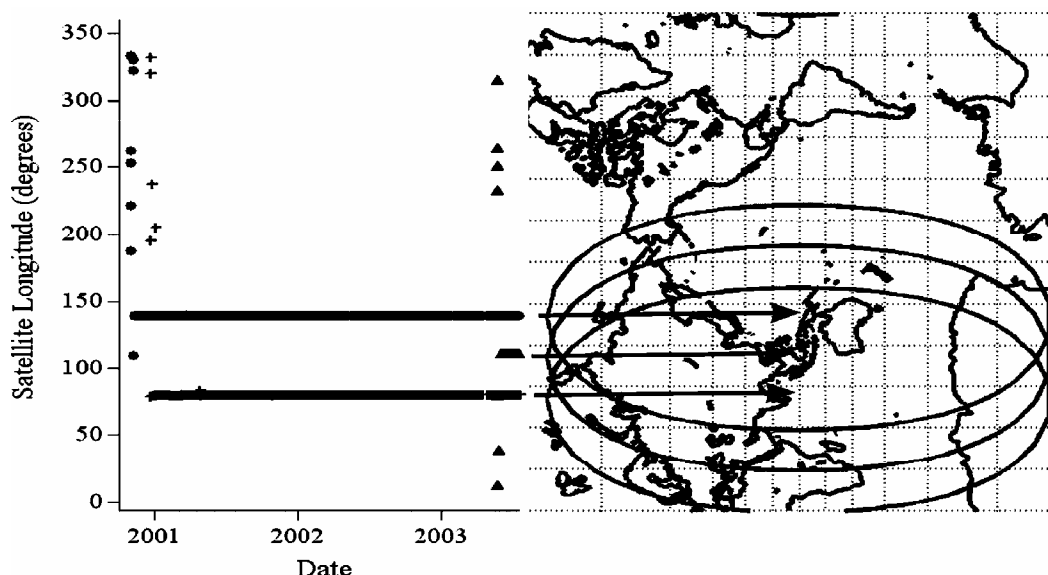


Рис. 1. История изменения долготы группировки Бейдоу. Стрелки указывают на приблизительное положение спутников на экваторе. Овалы в проекции Меркатора показывают области видимости каждого спутника. Пересечение всех трех овалов является областью функционирования системы. В начале срока службы каждого спутника он переводился из точки вывода на геостационарную орбиту к своему окончательному положению. Это объясняет, почему некоторые отдельные точки располагаются вдали от стандартных положений. По оси ординат отложена долгота спутника в градусах, по оси абсцисс – дата.

Эти изменения соответствуют абсолютным смещениям в 150 км к западу и востоку по мере изменения долготы спутника в течение месячного цикла коррекции орбиты. Имеется также суточная вариация примерно в ± 40 км к северу и югу из-за наклона каждого спутника. Хотя эти изменения относительно невелики по сравнению с высотой орбиты, превышающей 35 000 км, они существенны для целей навигации. Из-за этих изменений положения при расчете положения пользователя следует использовать текущие орбитальные параметры. Существующие космические навигационные системы должны делать одну и ту же операцию непрерывной передачи наиболее современных параметров пользователю для оценки его положения. Как будет обсуждаться ниже, объявленный Китаем режим работы не требует передачи этих параметров, поскольку положения рассчитываются в центре управления. Однако, поскольку известно, что спутники Бейдоу имеют бортовые ретрансляторы, и используют их в объявленном режиме работы, каждый спутник Бейдоу может передавать свои орбитальные параметры.

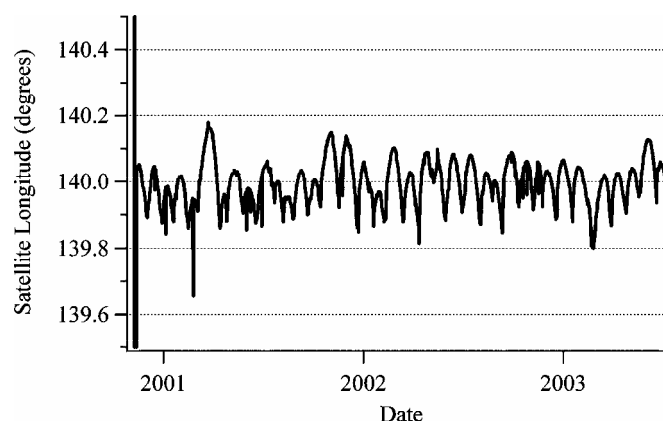


Рис. 2. Детальная история долготы спутника Бейдоу 1А. резкий скачок в сторону меньших долгот в момент 2001,2, вероятно, соответствует небольшой неточности измерения орбитальных параметров спутника и не является физическим свойством спутника. По оси ординат отложена долгота спутника в градусах, по оси абсцисс – дата.

КИТАЙСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ⁶

Китай, даже когда он запустил три спутника, заявлял, что он использует систему из двух спутников, базирующуюся на итеративном определении высоты пользователя; третий спутник рассматривался как находящийся на орбите резерв. Сообщалось, что эта система работает так: каждый из спутников непрерывно передает сигналы на все участки земли, видимые с него, пользователь принимает определенную часть этих сигналов и передает их обратно на спутник. Спутник, в свою очередь, направляет полученный сигнал на центр управления системой. Компьютеры в центре управления системой затем определяют расстояние между пользователем и спутником. Это достигается оценкой разности времени распространения между спутником и пользователем от момента, в который был первоначально передан сигнал, который должен быть каким-то образом отмечен как момент передачи⁷, до момента, когда ретранслированный сигнал пользователя достигнет центра управления. После этого центр управления скомбинирует начальную оценку высоты пользователя (и, следовательно, его расстояния до центра Земли), либо с последней сообщенной высотой, либо, возможно, с использованием произвольной оценки, такой, как уровень моря, с расстояниями до двух спутников для получения трех оценок расстояний для положения пользователя. Это определяет первую оценку широты и долготы пользователя. Затем карта области пользователя (предпочтительно хранящаяся в цифровом виде) используется для получения уточненной оценки высоты пользователя, которая после этого будет введена в расчет широты и долготы для уточнения оценки этих величин. Следующим шагом этого итеративного процесса могут быть новые временные измерения, или использование исходных временных измерений с

⁶ Я хотел бы поблагодарить проф. Ли Бина, директора программы контроля за вооружениями университета Циньхуа в Пекине за представление мне обзора концепции работы системы Бейдоу, представленной в статьях Gao Lu, "Double-Star Navigation System," *Contemporary Communication (Xiandai Tongxun)* (на китайском языке), No. 10, 1997, p. 20. "Beidou-1, Navigating for China," *Information of Remote Sensing (Yaogan Xinxi)* (на китайском языке), No. 2, 2003, p. 50. Wei Wucai, "Comparing Beidou Navigation System and GPS," *Marines Navigation Technology (Hanghai Jishu)* (на китайском языке), No. 6, 2003, pp. 15—16.

⁷ Эта временная метка необходима для того, чтобы избежать проблемы «неоднозначности дальности» в радиолокационных системах. Она может быть как простой, как разделение сигналов прямоугольной формы на время, превышающее общее время распространения сигнала от спутника до пользователя, или приблизительно четверть секунды, или сложной, как кодирование последовательности импульсов в последовательности прямоугольных сигналов. Следует отметить, что поскольку спутник действует как ретранслятор сигналов с земли, алгоритм временной метки может быть изменен в любое время без каких-либо изменений в системах спутника.

улучшенным значением высоты. Сомнительно, что использование дополнительных измерений поможет существенно повысить точность одиночного итерационного измерения, поскольку значительная часть ошибки является систематической, связанной с такими факторами, как многократные отражения или влияние атмосферы.

Указывалось⁸, что такой режим работы препятствует военному применению системы Бейдоу. Это определяется двумя факторами. Во-первых, в этом режиме работы пользователю нужно посылать сигнал на спутник, что может раскрыть положение любой системы оружия, которая использует спутник для навигационных целей. Во-вторых, сообщалось, что система непригодна при скоростях движения больше⁹ 0,28 км/с, поскольку быстро движущиеся пользователи «могут либо пропустить, либо задержать сигналы». Критическим фактором для понимания этого, по-видимому, является временная метка, связанная с трансляцией сигнала от спутника.

Временная метка системы Бейдоу может быть реализована различными способами, даже, если, как сообщается, на борту спутников Бейдоу не имеется атомных часов. Поскольку весь путь сигнала – от спутника до пользователя (и до центра управления), назад к спутнику от пользователя, и окончательно от спутника до центра управления – будет занимать меньше четверти секунды (и главным является разность времен), на каждом спутнике могут находиться сравнительно неточные часы. Кроме того, более прямым способом создания метки может быть передача времени от наземных атомных часов на каждый спутник Бейдоу после введения соответствующих задержек, принимающих во внимание различные длины пути до каждого спутника¹⁰. даже в этом методе потребуются шесть передач на расстояние в 36 000 км каждая (расстояние от земли до геостационарного спутника), когда включается передача ответа пользователю, потребуется менее трех четвертей секунды времени распространения.

В обеих этих методах требуется передача от пользователя для каждого измерения расстояния. Поэтому для каждого измерения положения потребуется две передачи от пользователя – по одной для каждого спутника. Следовательно, при получении положения возникнет задержка примерно в полсекунды, в предположении, что временем расчетов для итеративного расчета широты и долготы, а также любыми задержками в электронике можно будет пренебречь.

НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ МЕНЕЕ ЧЕТЫРЕХ СПУТНИКОВ

Вообще говоря, пользователь может узнать свое положение по трем различным опорным точкам для фиксации положения. Системы НАВСТАР/GPS и ГЛОНАСС позволяют пользователю получить эти три расстояния, позволяя ему оценить свое местное время; после этого три расстояния получаются их разности между временами передачи сигнала каждым спутником и местным временем пользователя. Хотя этот метод позволяет пользователю оставаться пассивным, по крайней мере в электромагнитном отношении, он требует использования по крайней мере четырех спутников (можно считать, что четвертый спутник составляет временную переменную).

Однако, имеются несколько способов, благодаря которым спутниковая навигационная система может работать менее, чем с четырьмя спутниками. Фактически можно использовать навигационную систему, имея три или два спутника, за счет увеличения сложности эксплуатации и соответствующего уменьшения полезности. Китай заявил, что система Бейдоу предназначена для функционирования только с двумя спутниками с ограничением «извест-

⁸ Ли Бин, директор программы контроля за вооружениями университета Циньхуа, частное сообщение.

⁹ Wang Xiaojin and Wang Xia, "Understanding "Beidou One" Navigation System," *Marines Navigation Technology (Hanghai Jishu)* (in Chinese) No. 1, 2004, p. 31., No. 6, *China's Satellite-Based Navigation System* 2003. И снова автор хотел бы поблагодарить Ли Бина, директора программы контроля за вооружениями университета Циньхуа в Пекине за предоставление обзора этой статьи.

¹⁰ Ли Бин указал, что сигнал распространяется «между землей и спутником четыре или пять раз», что, по-видимому, указывает на то, что это является реальным методом работы.

ной» высоты¹¹. Фактически, эта высота может быть определена с помощью итерационного процесса, в котором делается начальное предположение о высоте, которое затем подправляется с применением топографической карты (возможно, хранящейся в цифровом виде), после того, как будут сделаны более точные оценки реальной широты и долготы пользователя¹². Этот процесс, который рассматривается в данной статье как специальный случай системы трех спутников, более подробно обсуждается и анализируется в последующем разделе, после того, как будет представлен механизм оценки ошибок положения. Однако, поскольку Китай вывел на орбиту третий спутник, мы сначала рассмотрим, как может функционировать такая система.

Один из методов использования трех спутников заключается в том, что пользователь применяет свой собственный стандарт времени (используемый для измерения времени распространения сигналов и, следовательно, расстояния до спутников). Хотя этот метод неудобен, из-за требования частой синхронизации с базовыми часами системы, малый вес современных атомных часов (несколько килограммов) делает его работоспособным. Другой метод включает передачу сигнала от пользователя на каждый спутник, который ретранслирует его назад после усиления. После этого пользователь получает расстояние до спутника, измеряя время распространения сигнала, вводя поправку на задержку в ретрансляторе спутника и в атмосфере.

Третий метод для трех спутников, более применимый для гражданских, чем для военных, пользователей, заключается в дополнении спутниковой системы несколькими наземными станциями. Эти наземные станции, иногда называемые «псевдоспутниками»¹³, когда они используются вместе с GPS, должны находиться в поле зрения пользователя. Псевдоспутники успешно используются в навигации GPS, когда требуется повышенная локальная точность, например, в районе аэропортов. Это серьезно ограничивает покрытие спутниковой системы, и, как можно выразиться, превращает спутниковую часть системы в очень дорогое дополнение к наземной системе. Системы с такими наземными компонентами не рассматриваются в этой статье, поскольку их покрытие, ограниченное районами внутри области контроля владельца, делает их бесполезными для всех военных пользователей, за исключением сугубо оборонительных.

Марк Стурза¹⁴ показал, что если у пользователя есть точные часы, он может определить свое положение с точностью, определяемой геометрией спутниковой группировки и ошибкой часов пользователя (все спутниковые навигационные системы также имеют вклады в ошибку от¹⁵ смещения часов спутника, точности определения орбиты, ошибок из-за шумов, и ошибок от неоднозначности пути, т.е. отражения радиосигнала от земли и других объектов). Эти ошибки умножаются на коэффициент, определяемый геометрией группировки. Поскольку такая навигационная система из трех спутников довольно необычна, определение связанных с ней матриц ошибок Стурза воспроизведено в Приложении.

Для этого анализа важным результатом работы Стурза является формула для ошибки трехмерного положения пользователя:

$$\sigma_{3sat}^2 = \sigma_{\rho}^2 \left[\left(H_3^T H_3 \right)^{-1} + \frac{\sigma_b^2}{\sigma_{\rho}^2} H_3^{-1} \mathbf{1} \cdot \mathbf{1}^T H_3^{-T} \right]$$

где H_3 – матрица косинусов направлений от пользователя на каждый из трех спутников, σ_{ρ} – ошибка, связанная с электроникой и прочими факторами, и σ_b – ошибка местных высокоточ-

¹¹ Ли Бин, частное сообщение.

¹² Там же.

¹³ Bryant D. Elrod and A. J. Van Dierendonck, Pseudolites, in Bradford W. Parkinson and James J. Spilker Jr. (eds.), *Global Position System: Theory and Applications, Volume 2*, (Washington D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996), pp. 51-79.

¹⁴ Mark A. Sturza, "GPS Navigation Using Three Satellites and a Precise Clock," *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, vol. 30, (1983), pp. 146-156.

¹⁵ J. J. Spilker Jr., Satellite Constellation and Geometric Dilution of Precision, in Bradford W. Parkinson and James J. Spilker Jr. (eds.), *Global Position System: Theory and Applications, Volume 1*, (Washington D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996), pp. 177-208.

ных часов пользователя. В этой статье рассматривается случай, когда ошибка часов пользователя отсутствует, т.е. $\sigma_b = 0$. в этом случае ошибка системы дается выражением:

$$\sigma_{3sat}^2 = \sigma_\rho^2 (H_3^T H_3)^{-1}$$

Важно отметить, что эта ошибка пропорциональна ошибке, определенной только из геометрии группировки спутников. Геометрия группировки из трех спутников дает наименьшие ошибки, когда два спутника находятся на горизонте пользователя и расположены на 90° друг от друга, а третий спутник находится точно в зените, предоставляя в основном измерение высоты. Как мы видели, группировка Бейдоу из трех геостационарных спутников, которая из Пекина представляется почти линейной (см. рис. 4), далека от оптимальной. Так называемые методы «дифференциальной GPS», отличные от добавления любой псевдоспутниковой наземной станции, не смогут улучшить геометрического фактора, поскольку мы предполагаем, что система не пытается преодолеть алгоритма шифрования.

Такая ошибка появляется также в системах, таких, как LocStar или GeoStar,¹⁶ где пользователю не нужно иметь своих высокоточных часов и вместо этого производится обратная ретрансляция сигнала от пользователя. В таких системах пользователь измеряет разницу времени между уходящим и возвращающимся сигналом – режим работы отличается от объявленного для группировки Бейдоу. Хотя такая система обладает преимуществом из-за снятия требования по высокоточным часам, которые должны оставаться стабильными в течение длительного периода, пользователь таких систем рискует выдать свое положение, излучая исходный сигнал.

ТОЧНОСТЬ В КИТАЙСКОЙ КОНЦЕПЦИИ РАБОТЫ

Насколько точным будет измерение положения? Тот же формализм, который был определен для задачи трех спутников, может быть использован для оценки конечной точности системы с принятием центра Земли за третий «спутник». Отметим, что эта третья опорная точка очевидно расположена в экваториальной плоскости, так же, как и спутники Бейдоу. Получающееся ухудшение горизонтальной точности показано на рис. 3 (поскольку высота является ограничением, вертикальное ухудшение точности не определено). Для большинства Китая эта система будет давать точности положения, сравнимые с точностью НАВСТАР/GPS, при условии доступности точных карт высот и не очень сильных уклонов в области.

Хотя эта система обладает достаточной точностью для наземных пользователей при использовании итерационного режима такого типа, все еще остаются некоторые вопросы ее конечного применения. Например, количество пользователей, которые могут иметь доступ к системе, ограничивается центром управления Бейдоу, рассчитывающим положение каждого пользователя и посылающим ему результаты. Фактически, система, работающая в таком режиме, больше походит на экспериментальную систему, чем на действующую систему. Если это так, то почему Китаю понадобилось вывести на орбиту третий спутник в качестве запасного? Какие возможности дает системе третий спутник, и, в особенности, какие военные возможности? Будет ли существующая система всегда использоваться в этом итерационном режиме и всегда ли пользователь будет передавать сигнал на спутник, получая назад свое положение? Фактически с запуском третьего спутника Бейдоу пользователь может оставаться пассивным при условии наличия у него своих высокоточных часов. Это будет так даже при отсутствии на существующих спутниках Бейдоу атомных часов, поскольку наземный центр управления может передавать сигналы времени на каждый спутник для ретрансляции. Интересно отметить, что некоторые китайские ученые уже опубликовали статьи о таком режиме работы¹⁷.

¹⁶ Я хотел бы поблагодарить Грегори Кулаки из Союза обеспокоенных ученых, указавшего мне на эту систему.

¹⁷ Lin Xueyuan and Liu Jianye, "The Study on Improvement of "Beidou" Double-Star Navigation System and Its Algorithm," *Chinese Journal of Space Science (Kongjian KexueXuebao)* (in Chinese), Vol. 23, No. 2 (2003), pp. 149-154. И снова автор хотел бы побла-

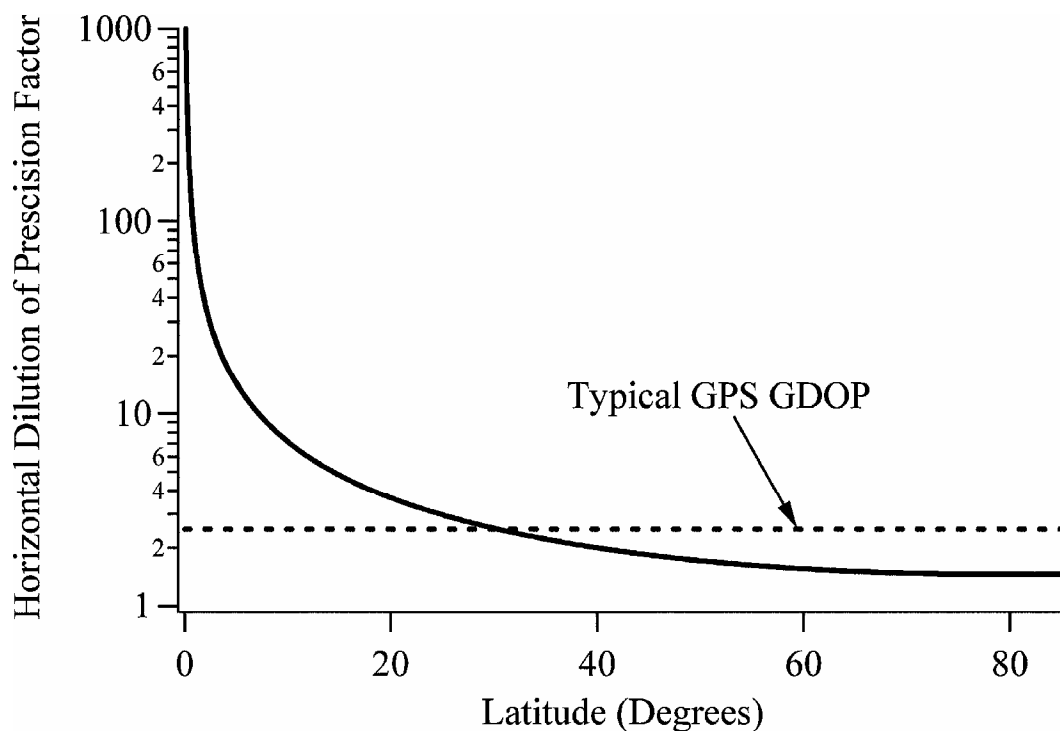


Рис. 3. Ухудшение горизонтальной точности (УГТ) для китайской системы двух спутников с известной высотой в качестве ограничения. Отметим, что коэффициент ошибки для системы Бейдоу становится равным, а затем и лучшим, чем типичное УГТ для НАВСТАР/GPS на широтах, превышающих примерно 30°. Типичное максимальное УГТ для НАВСТАР/GPS показано пунктирной линией. Минимальная широта Китая примерно равна 20°, так что для большинства внутренних пользователей эта система будет давать довольно точные результаты. Поскольку в этой системе высота используется как ограничение, ухудшение вертикальной точности (УВТ) не определено. По оси ординат отложен коэффициент ухудшения горизонтальной точности, по оси абсцисс – широта.

Оставшаяся часть этой статьи посвящена исследованию потенциального военного применения существующей системы из трех спутников. В ней предполагается, что сигналы точного времени могут передаваться со спутника, возможно, как простая ретрансляция сигналов времени с земли, вероятно, что эта возможность на спутниках уже используется. Мы также предполагаем, что каждый пользователь будет иметь свое опорное время, возможно, в виде атомных часов, так что одновременно могут определяться все три координаты (широта, долгота и время). Точность этой системы, которая в основном зависит от геометрии группировки Бейдоу, может быть затем использована для оценки применимости системы для военных целей.

НАЗЕМНОЕ ВОЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕЙДОУ

Полезно отметить, что в группировке из четырех спутников можно достичь близкого к теоретически оптимальному УГТ¹⁸, если три спутника равномерно распределены по горизонту пользователя, а четвертый находится точно в зените. С другой стороны, геометрия группировки Бейдоу сильно отличается от этого. На рис. 4 показано расположение группировки Бейдоу, видимое наземным наблюдателем в Пекине.

годарить Ли Бина, директора программы контроля за вооружениями университета Циньхуа в Пекине за предоставление обзора этой статьи.

¹⁸ J. J. Spilker Jr., Satellite Constellation and Geometric Dilution of Precision, in Bradford W. Parkinson and James J. Spilker Jr. (eds.). *Global Position System: Theory and Applications, Volume 1*, (Washington D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 1996), pp. 197-198.

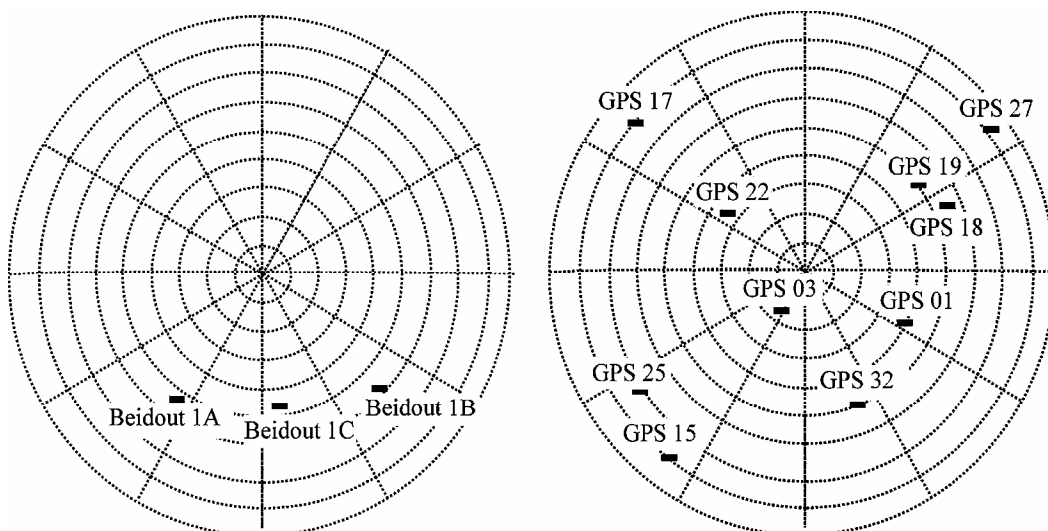


Рис. 4. Слева показана группировка Бейдоу, наблюдаемая из Пекина; справа показано реальное положение группировки спутников НАВСТАР/GPS в небе Пекина (в отдельный момент, поскольку спутники GPS не находятся на геостационарной орбите). Концентрические окружности представляют линии постоянного наклонения, а радиальные линии являются линиями азимута, исходящими из местного зенита. Названия спутников помещены рядом с их маркерами.

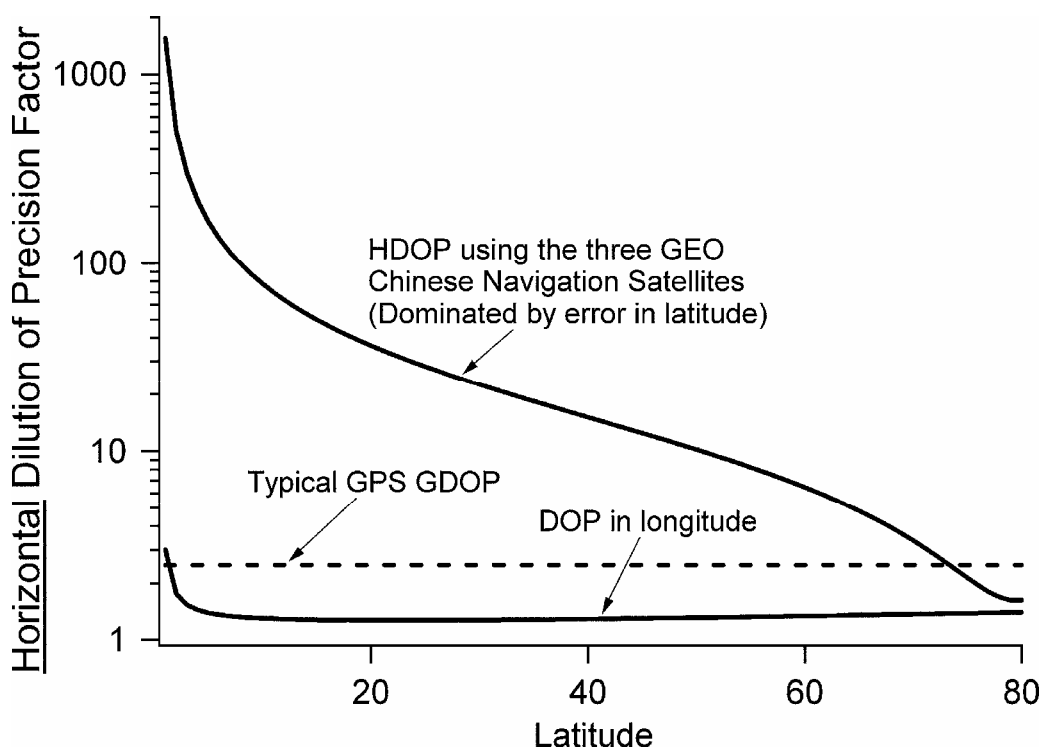


Рис. 5. Показан коэффициент ухудшения горизонтальной точности, или УГТ, для группировки спутников Бейдоу. Как можно видеть из сравнения типичным максимальным коэффициентом УГТ для GPS в 2,5, который включает вертикальный фактор, геометрия группировки приводит к точности, заметно худшей точности GPS почти во всей покрываемой области. Показана также проекция УГТ в восточно-западном направлении. По оси ординат отложен коэффициент ухудшения горизонтальной точности, по оси абсцисс – широта. Верхняя сплошная кривая представляет УГТ для трех китайских геостационарных навигационных спутников (доминирует ошибка по широте). Нижняя сплошная кривая представляет УГТ для долготы, а пунктирная кривая – УГТ для GPS.

Зная известное положение спутников Бейдоу, можно рассчитать коэффициенты ухудшения горизонтальной и вертикальной точности в соответствии с процедурами, приведенными в предыдущем разделе. Эти коэффициенты, конечно, будут зависеть от положения наблюдателя. Мы предпочли отобразить зависимость значений УГТ и ВГТ от широты при фиксированной долготе, примерно в середине покрываемой области (на долготе Пекина). Получившиеся коэффициенты точности показаны на рис. 5. Для удобства сравнения приведено типичное максимальное принятое значение УГТ¹⁹ для НАВСТАР/GPS, равное 2,5. Однако, эта величина для НАВСТАР/GPS включает ВГТ и поэтому искусственно улучшает сравнение.

Табл. 2. Сравнение точностей различных вооружений.

| Система оружия | Точность КВО (м) |
|--|------------------|
| Современное «умное оружие» США | |
| Единое оружие прямой атаки (JDAM), GBU 31/32, с встроенным инерциальным управлением и GPS ¹ . | < 13 |
| JDAM GBU 31/32, только с инерциальным управлением ² . | ~ 30 |
| Крылатая ракета воздушного базирования с обычной боеголовкой AGM-86D (block II) ³ | ~ 5 |
| Воздушная бомбардировка без инерциального управления и GPS | |
| Современное бомбометание с пикирования (в условиях учебного полигона) ⁴ | ~ 10 |
| Бомбометание с горизонтального полета (США, вторая мировая война) ⁵ | 1000 |
| Бомбометание с горизонтального полета (США, корейская война) ⁶ | 300 |
| Бомбометание с горизонтального полета (США, вьетнамская война) ⁷ | 120 |
| Некоторые современные тактические ракеты Китая | |
| DF-15A (твердотопливная баллистическая ракета с инерциальной навигацией и управлением на конечном участке) ⁸ | 30 – 45 |
| DF-11 (твердотопливная баллистическая ракета с инерциальной навигацией и управлением на конечном участке) ⁸ | 600 |
| Исторические ракеты | |
| Немецкая крылатая ракета V-1 ¹⁰ | 19 000 |
| Немецкая баллистическая ракета V-2 ¹¹ | 15 000 – 20 000 |
| 1. Air Force Link Factsheet, http://www.af.mil/factsheet.asp?fsID=108 (14 июля 2004 г.). 2. Там же. 3. Michael Russell Rip and James M. Hasik, <i>The Precision Revolution: GPS and the Future of Aerial Warfare</i> , (Annapolis, MD: Naval Institute Press, 2002), p. 257. 4. Т. Postol, частное сообщение. 5. Richard P. Hallion, Precision Guided Munitions and the New Era of Warfare, Air Power Studies Centre Working Paper #53. Эту статью можно найти в сети Интернет http://www.fas.org/man/dod-101/sys/smart/docs/paper53.htm (14 июля 2004 г.). Информация по КВО получена по брифингу BBC в HQ USAF/XOX, "Air Power Lethality and Precision: Then and Now," весна 1990 г. 6. Там же. 7. Там же. 8. Janes Strategic Weapons System, www.janes.com (14 июля 2004 г.). 9. Там же. 10. Major Kirk M. Kloeppel, The Military Utility of German Rocketry During World War II, AU/ACSC/0609/91-03. (Air Command and Staff College) March 1997, p. 29; http://research.airuniv.edu/yiewabstract.aspx?id=159 (14 июля 2004 г.). 11. Janes Strategic Weapons System, www.janes.com , см. offensive weapons-obsolete systems, (14 июля 2004 г.). | |

¹⁹ J. J. Spilker Jr. and Bradford W. Parkinson, Overview of GPS Operation and Design, in Bradford W. Parkinson and James J. Spilker Jr. (eds.), *Global Position System: Theory and Applications, Volume 1*, (Washington D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996), p. 36.

Как можно было бы ожидать из того факта, что спутники Бейдоу находятся на геостационарных орбитах и, следовательно, представляются наземному наблюдателю как лежащие почти на прямой линии, группировка дает большие ошибки в определении широты пользователя, в направлении север-юг. В то же время она дает сравнительно точные положения по долготе.

Для того, чтобы оценить, как эта система может быть использована для военных применений, необходимо оценить все факторы ошибок, возникающие из других, негеометрических источников ошибки. Невозможно сделать точную независимую оценку этого фактора ошибки без анализа станции пользователей Бейдоу и не зная ошибок, связанных с определением положения ее спутников на орбите. Однако, можно определить верхний предел точности системы, предполагая, что электроника и т.п. вносят ошибку, такую же, как у системы НАВСТАР/GPS. Это, конечно, предполагает, что электронная инфраструктура Китая не намного лучше, чем у США, что представляется разумным предположением.

Сообщалось²⁰, что военный режим системы НАВСТАР/GPS обладает точностью, несколько лучшей, чем 10 метров. Принимая эту точность и сообщавшийся фактор УГТ, равный 2,5, мы можем оценить, что все факторы, вносящие вклад в негеометрическую ошибку, создают масштабный множитель порядка 3 метров. Мы можем предположить такое же значение множителя для китайской системы, чтобы получить верхний предел пространственной ошибки.

При этом предположении горизонтальная ошибка системы в Тайбее (на широте 25° с.ш.) составит 84 метра в направлении север-юг и 3,9 метра в направлении запад-восток. Это можно сравнить с точностями, связанными с бомбометанием при горизонтальном полете (во время вьетнамской войны) и с бомбометанием с пикирования (на полигонах без противодействия ПВО) в 120 метров и 10 метров соответственно (более широкий ассортимент сравнения приведен в табл. 2). Конечно, эти точности бомбометания представляют собой стандартное КВО (круговое вероятное отклонение), которое соответствует радиусу, внутри которого падает 50% бомб, а 50% падает снаружи, в то время как система навигационной ошибки соответствует строгим 68%. Тем не менее, вероятно, что ошибка положения навигационной системы должна быть лучше, чем точность бомбы. Сама по себе навигационная система Бейдоу, похоже, обладает недостаточной точностью для того, чтобы оправдать расходы на космическую навигационную систему для военных целей.

Другое возможное военное применение системы может включать использование спутниковой навигации в качестве вспомогательной навигационной системы для крылатых ракет. Например, если китайские навигационные системы достаточно точны для определения ошибок в поперечном отклонении от курса порядка метров, то недостаточно точны для определения дальности с той же точностью. (Это является гипотетической ситуацией, для которой у автора нет достаточных свидетельств. Вместо этого, она в основном предназначена для иллюстрации технических ограничений использования современной группировки Бейдоу для наземных применений.) если это так, то Китай может направить крылатые ракеты против Тайбея вдоль долготных траекторий и использовать систему Бейдоу для прекращения полета. Это может придать китайским крылатым ракетам точность, сравнимую с точностью крылатых ракет США, но только в том случае, если их инерциальные навигационные системы обладают теми же характеристиками по определению поперечного отклонения.

ДОПОЛНЕНИЯ К ГРУППИРОВКЕ?

Хотя современная китайская навигационная система Бейдоу определенно не может обеспечить той же точности для управляемого оружия, как система НАВСТАР/GPS, и, скорее всего, не сможет обеспечить улучшения по сравнению с бомбометанием с пикирования, все же имеются космические компоненты, которые могут быть к ней добавлены, оставив ее местной региональной системой, сравнимой с GPS. Наиболее прямым способом добиться этого является добавление дополнительных четырех спутников на орбитах так называемого типа «Молнии». Спутники на таких орбитах могут улучшить геометрию, уменьшив таким способом геометрическую ошибку системы появлением спутников находящихся для пользователя далеко к северу от существующих геостационарных спутников, а также устранением

²⁰ Там же [19].

необходимости пользователя иметь при себе точные часы или другие средства, требующиеся для группировки из трех спутников. (С другой стороны, добавление четвертого спутника на геостационарной орбите не может привести столь же существенного улучшения геометрии, как добавление спутника на орбите «Молнии».) в этом разделе мы рассмотрим как можно добиться такого улучшения, добавляя спутники на орбите «Молнии».

Орбиты «Молнии» представляют собой высокие эллиптические орбиты с наклоном около 63° . Преимуществом таких орбит является то, что одиночный спутник может оставаться примерно в течение шести часов на широтах от 40° до 60° . Для того, чтобы обеспечить непрерывное покрытие Азии, потребуется четыре таких спутника. Эти орбиты, иллюстрируются на рис. 6 и 7, которые показывают орбиты по отношению к Земле и орбиты, наблюдаемые из Пекина, соответственно.

Включение дополнительных четырех спутников на орбитах «Молнии» существенно повлияет на улучшение теоретических характеристик системы Бейдоу, в предположении, что в любой момент времени могут быть использованы все три геостационарных спутника и один спутник на орбите «Молнии». Если так будет, то включение спутников на орбите «Молнии» освободит пользователя от необходимости иметь при себе точные часы. Это также значительно улучшит геометрию группировки. (В то время, как один из спутников на орбите «Молнии» проходит мимо спутника Бейдоу-1В, другой покажется к северу от Пекина. Получающийся коэффициент геометрического уменьшения точности, рассчитанный с использованием стандартных методов для четырех или более спутников²¹, показан на рис. 8. когда в группировку включаются четыре спутника на орбитах «Молнии», коэффициенты геометрического уменьшения точности (ГУТ) и уменьшения горизонтальной точности (УГТ) значительно уменьшаются, в основном из-за присутствия спутника на высоких широтах. В этом случае мы ожидаем, что пространственные точности будут значительно лучше 30 метров. Это, по-видимому, позволит управляемому оружию БЕЙДОУ/Молния попасть в ту же категорию, что JDAM только с инерциальным наведением (но с качеством наведения НАВСТАР/GPS в точке старта).

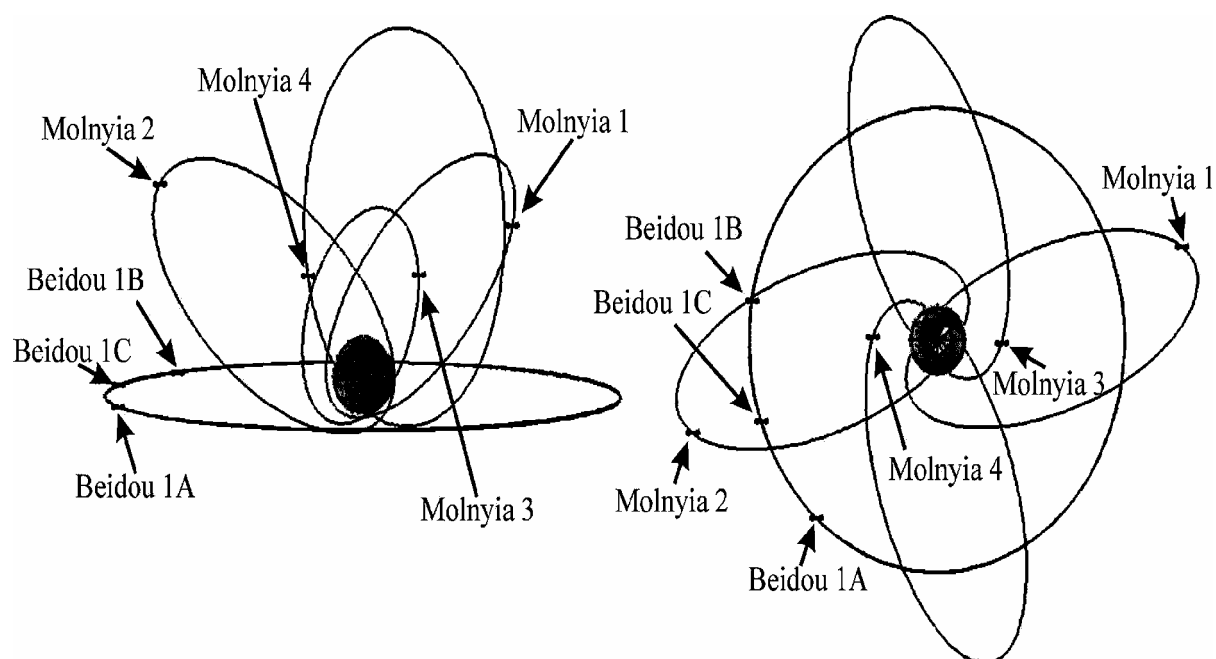


Рис. 6. Орбиты гипотетически дополненной навигационной системы Бейдоу, с точки зрения наблюдателя над экватором (слева) и над Северным полюсом (справа). Существующие спутники на геостационарной орбите обозначены как Beidou 1A, 1B, 1C. Гипотетические дополнительные спутники обозначены как Molniya 1, 2, 3, 4.

²¹ См., например, ссылку [6].

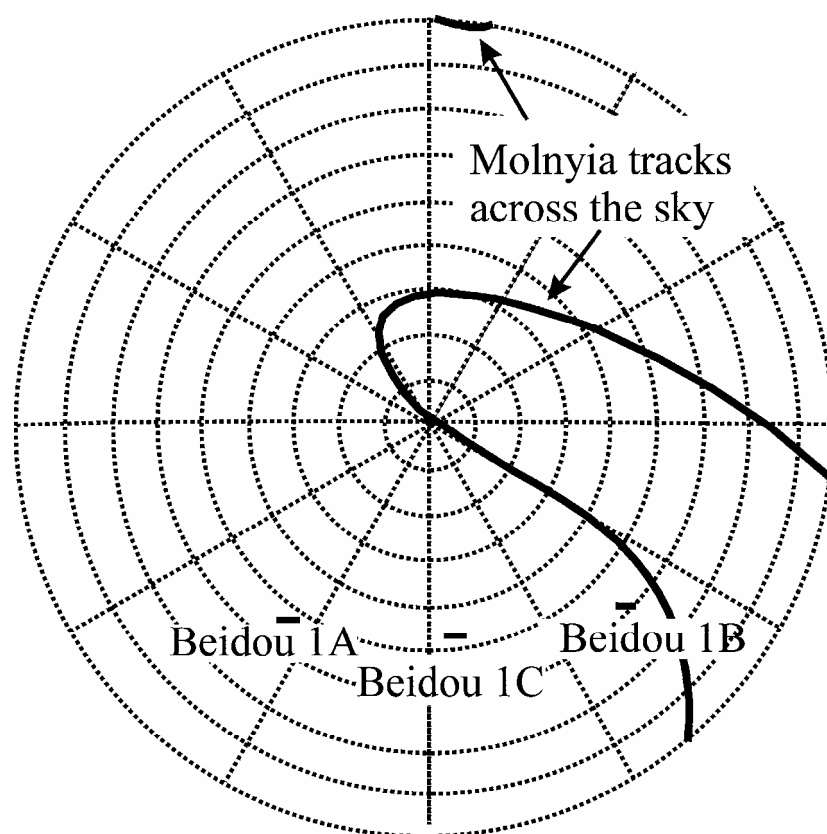


Рис. 7. След гипотетических спутников на орбите «Молнии» в пекинском небе показан на этом рисунке сплошной линией. Центром концентрических окружностей, из которого выходят азимутальные линии, является местный зенит. Существующие спутники на геостационарной орбите обозначены как Beidou 1A, 1B, 1C.

Однако, у Китая нет опыта применения орбит «Молния», как это иллюстрируется диаграммой распределения апогеев всех китайских спутников²² на рис. 9. (Все четыре спутника на высоких эллиптических орбитах, как показано на этом рисунке, имеют наклоны, меньшие 35° .) Хотя наклоны орбит «Молнии» выбраны таким образом, чтобы их орбиты не прецессировали²³, некоторое перемещение орбитальной оси вокруг Земли неизбежно. Это может потребовать от Китая научиться новым методам поддержания орбиты. Китай должен будет также улучшить методы точного определения этих уникальных орбит, учитывая тот факт, что ошибки в параметрах орбиты внесут вклад в ошибки положения навигационной системы. Вероятно, учитывая китайский опыт постепенного улучшения ракетно-космических систем, как это иллюстрируется более, чем двухлетним интервалом между запуском двух первых спутников Бейдоу и запуском третьего спутника, Китаю потребуется много лет для вывода на орбиту полной усиленной навигационной группировки, если он решит сделать это.

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕЙДОУ

Хотя китайская навигационная система Бейдоу не представляется способной обеспечить точность, необходимую для наземного военного использования, она обладает потенциалом помочь в навигации китайских межконтинентальных баллистических ракет (МБР). Мы рассмотрим два возможных применения этой системы для помощи в навигации МБР.

²² Из информации, представленной на веб-сайте группы орбитальной информации НАСА 14 июля 2004 г. (<http://oigl.gsfc.nasa.gov/>), в которой указываются исторические орбитальные элементы почти всех спутников, которые были когда-либо запущены, включая все китайские.

²³ James R. Wertz, *Mission Geometry; Orbit and Constellation Design and Management* (El Segundo, CA: Microcosm Press, 2001), p. 85.

Во-первых, мы рассмотрим возможность использования информации о скорости из доплеровских измерений сигналов Бейдоу для определения более точной отсечки тяги МБР. Во-вторых, мы рассмотрим трехмерное определение положения блока разведения, предоставляемое системой Бейдоу, для точного определения кеплеровской траектории. За этим определением траектории последуют коррекции орбиты. Представляется, что первая возможность непрактична из-за слишком долгого времени, необходимого для точного определения скорости. Однако, удивительно, что второй метод предоставляет Китаю реальную возможность улучшения навигации МБР до момента разведения своих индивидуально нацеливаемых боеголовок. Ниже обсуждаются оба анализа в контексте существующих китайских сил МБР.

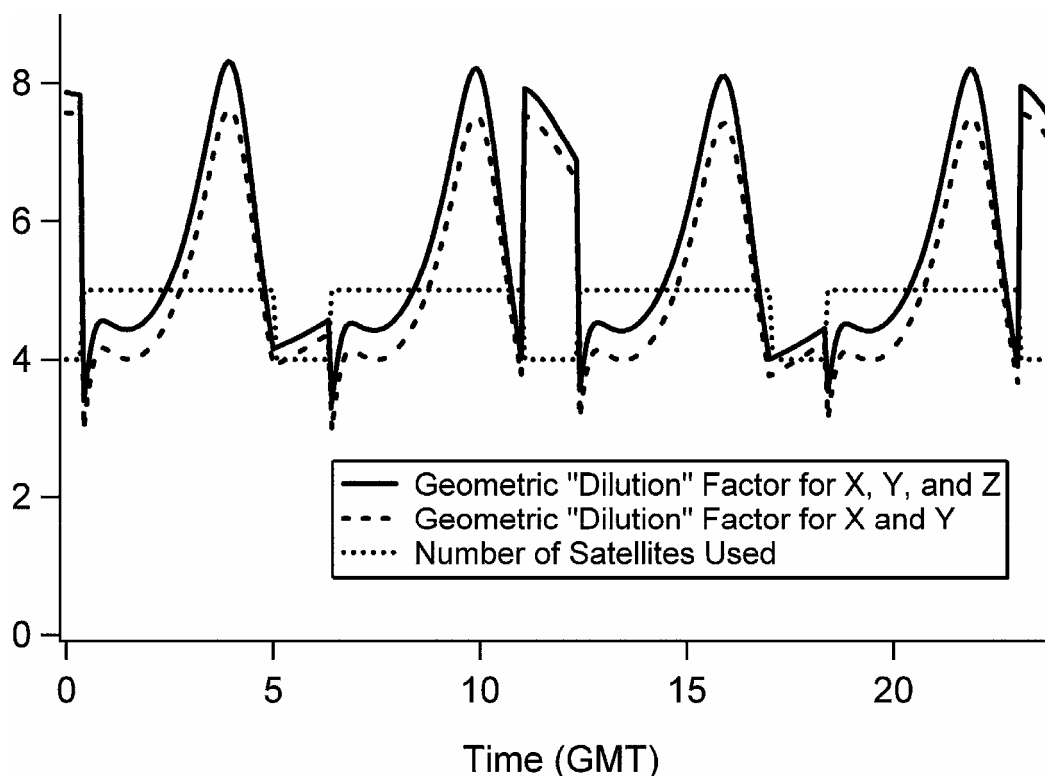


Рис. 8. Показаны различные коэффициенты геометрического уменьшения точности для гипотетической системы существующей группировки Бейдоу и четырех дополнительных спутников на орбитах «Молнии». Четыре орбиты «Молнии» выбраны таким образом, чтобы гарантировать, чтобы над районом всегда находился по крайней мере один спутник. Однако, в течение большей части времени, два спутника на орбите «Молнии», видимые пользователями, могут быть включены для определения положения. По горизонтальной оси отложено время по Гринвичу, по вертикальной оси отложены значения коэффициентов. Сплошная линия представляет коэффициент геометрического уменьшения точности для осей X, Y и Z; штриховая линия представляет коэффициент геометрического уменьшения точности для осей X и Y; пунктирная линия показывает количество используемых спутников.

Согласно опубликованным источникам, у Китая имеется только небольшой арсенал из семи МБР DF-5А с ядерными боеголовками, способных достичь Соединенных Штатов²⁴. хотя возможно, что эти ракеты уже снабжены разделяющимися боеголовками, многие аналитики полагают, что они оснащены одиночной, большой (3 мегатонны) ядерной боеголовкой²⁵. Оценки КВО ракетной системы лежат в пределах от 500 до 3 500 метров²⁶. в неопределен-

²⁴ William M. Arkin, Robert S. Norris and Joshua Handler, *Taking Stock: Worldwide Nuclear Deployments 1998* (Washington D.C.: Natural Resources Defense Council, Inc.), p. 89.

²⁵ Jane's Strategic Weapons System, в сети Интернет по адресу www.janes.com (14 июля 2004 г.).

²⁶ Этот диапазон КВО взят на веб-сайте ФАС по адресу <http://www.fas.org/nuke/guide/china/icbm/df-5.htm> (14.07. 2004 г.).

ность точки падения ракеты вносят вклад многие факторы, включая выбор времени отсечки тяги, гравитационные аномалии вблизи стартовой позиции, и неопределенности входа в атмосферу, такие, как местные погодные условия и небольшие нерегулярности боеголовки²⁷. Наибольший вклад вносят эффекты, присутствующие на активном участке траектории, которые могут, в большой степени, характеризоваться неопределенностью трехмерной скорости ракеты в момент выключения двигателя.

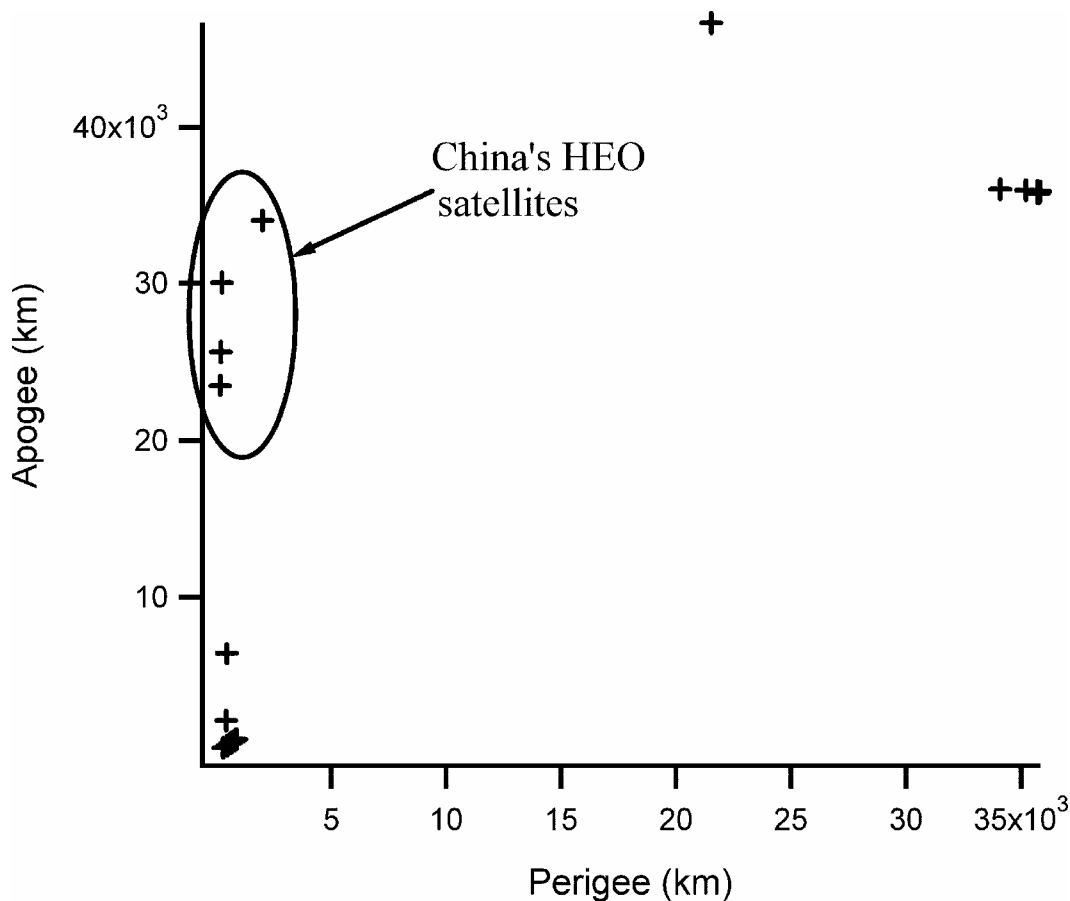


Рис. 9. Соотношение между апогеем (высотой спутника на максимальном расстоянии от Земли) и перигеем (высотой спутника при максимальном сближении с Землей) для всех находившихся на орбите китайских спутников на 25 сентября 2003 г. В овале находятся четыре спутника на высоких эллиптических орбитах. Ни у одного из них наклонение не превышает 35°. По горизонтальной оси отложено значение высоты перигея в километрах, а по вертикальной оси отложено значение высоты апогея в километрах.

Для количественной характеристики этих неопределенностей активного полета было проведено компьютерное моделирование в предположении вращающейся круглой Земли, включающее реалистичные атмосферные эффекты. Хотя это и было не важно для этого анализа, в модели были использованы детальные характеристики ракеты DF-5A – такие, как отношения масс, длительности работы двигателей, и т.п. – полученные для гражданского варианта²⁸ этой ракеты, китайской ракеты-носителя «Великий поход 2С»²⁹. После корректировки различных параметров запуска, таких, как азимут пуска, угол подъема, и скорость изменения угла подъема, таки образом, чтобы ракета долетела из своей стартовой площадки

На сайте Jane's, с другой стороны, указано КВО в 800 метров.

²⁷ Mathew Bunn, "Technology of Ballistic Missile Reentry Vehicles," Report no. 11 of the Program in Science and Technology for International Security, MIT, March 1984, p. 12.

²⁸ Jane's Strategic Weapons System, в сети Интернет по адресу www.janes.com для DF-5 (14.7.2004).

²⁹ China Academy of Launch Vehicle Technology, *LM-3A User's Manual*, доступно в сети Интернет по адресу <http://www.calt.com.cn/new/english/#> (14 июля 2004 г.).

в Ксюаньхуа в Китае ($40,36^\circ$ с.ш., $115,03^\circ$ в.д.)³⁰ до Вашингтона, скорость при отсечке двигателя изменялась на небольшую величину, как в продольном, так и в поперечном направлениях. Невозмущенная траектория показана на рис. 10. Отметим, что траектория проходит очень близко к Северному полюсу. Траектория с другой пусковой площадки DF-5A в Луонинге, Китай ($34,23^\circ$ с.ш., $111,39^\circ$ в.д.) также проходит очень близко к Северному полюсу. Это важно, если учитывать геометрию группировки Бейдоу. Распределение точек падения для различных небольших возмущений скорости показано на рис. 11.

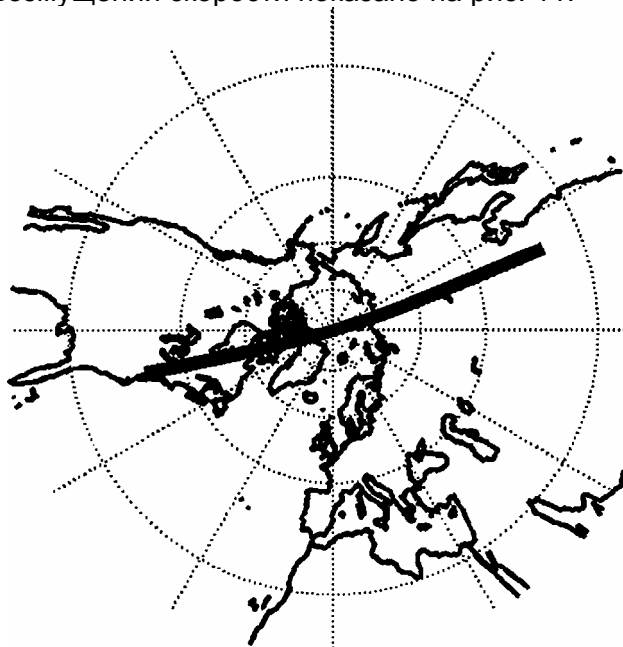


Рис. 10. Невозмущенная траектория DF-5A от Ксюаньхуа в Китае до Вашингтона. Евразия находится на правой стороне этой гномической полярной проекции, а североамериканский континент – справа. Траектория ракеты показана толстой сплошной линией.

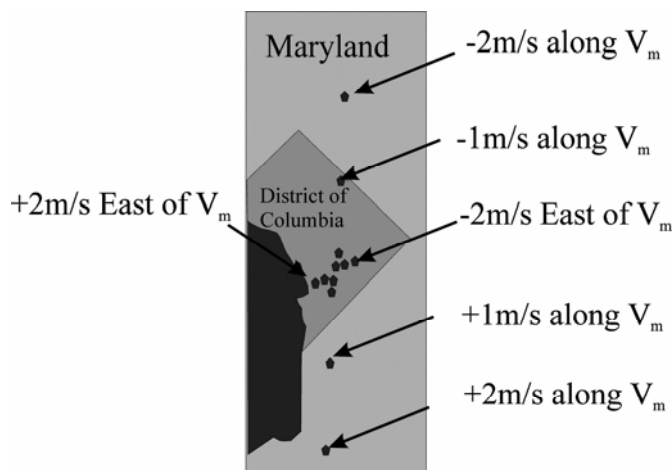


Рис. 11. Точки падения при небольших изменениях скорости при отсечке двигателя. Номинальная точка падения находится на юге Вашингтона вблизи Капитолия. Надписи на рисунке (слева направо и сверху вниз): 1 – +2 м/с к востоку от V_m ; 2 – Мэриленд; 3 – округ Колумбия; 4 – -2 м/с вдоль V_m ; 5 – -1 м/с вдоль V_m ; 6 – -2 м/с к востоку от V_m ; 7 – +1 м/с вдоль V_m ; 8 – +2 м/с вдоль V_m .

Очевидно, что наибольшие изменения точки падения вызваны возмущениями скорости ракеты при отсечке двигателя вдоль направления полета. Количественные характеристики

³⁰ William M. Arkin, Robert S. Norris, Joshua Handler, *Taking Stock: Worldwide Nuclear Deployments 1998* (Washington B.C.: Natural Resources Defense Council, Inc.) p. 89.

показаны на рис. 12 в зависимости от изменений скорости вдоль и поперек номинальной траектории. Следовательно, изменение в 1 м/с номинальной скорости ракеты (которая равна 7,2 км/с) приводит к промаху по расстоянию в 9,7 км, в то время как аналогичное отклонение поперечной скорости приводит к промаху в 1,2 км. Иначе говоря, для получения промаха менее 500 метров необходимо контролировать продольную скорость с точностью лучше 0,05 м/с.

Если наименьшие оценки КВО DF-5A правильны, то китайцы должны контролировать скорость в момент отсечки двигателя с такой точностью. Для интегрирующего акселерометра для DF-5A это означает точность в семь частей на миллион. Однако, при анализе использования доплеровских измерений спутников Бейдоу для определения момента отсечки, который будет приведен ниже, будет полезно переформулировать это в терминах точности оценки времени. Как никак, доплеровские измерения, как будет показано ниже, требуют минимального количества времени, которое полностью определяется требуемой точностью и частотой несущей волны. Без увеличения несущей частоты электроника не сможет ускорить процесс измерения.

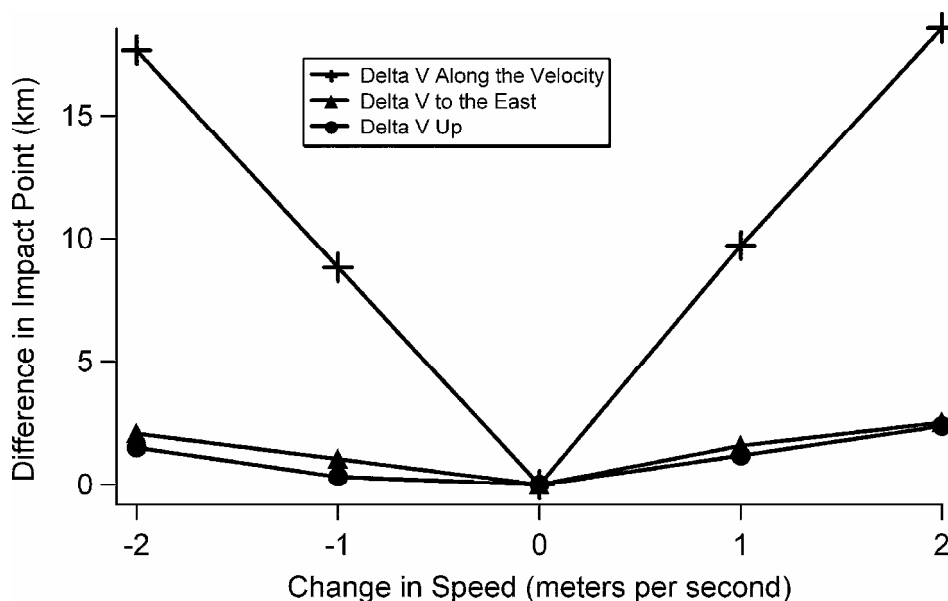


Рис. 12. Расстояние между точками падения с возмущенной и номинальной скоростью при отсечке двигателя при атаке на Вашингтон. Возмущения скорости вдоль траектории ракеты приводят к большим промахам, чем возмущения, перпендикулярные к номинальной скорости. На горизонтальной оси показано изменение скорости в метрах в секунду, а на вертикальной оси – различие в точках падения в километрах. Крестиками отмечены результаты для возмущений вдоль траектории, треугольниками – для возмущений в восточном направлении, а сплошными кружками – для возмущений в вертикальном направлении.

В этом смысле требования к определению времени могут быть оценены из профиля ускорения компьютерной модели, показанной на рис. 13, в предположении, что DF-5A не сбрасывает свою тягу на нескольких последних секундах полета. Поскольку DF-5A достигает максимального ускорения в $70,9 \text{ м/с}^2$ прямо перед выключением двигателя, это соответствует точности отсечки двигателя в 0,0007 секунды. Меньшие значения промаха соответствуют еще большей точности определения времени и показаний акселерометра. Конечно, это требование может быть несколько менее жестким при уменьшении тяги жидкостного двигателя DF-5A. Однако, этот метод не будет работать с твердотопливной ракетой, над которой, как сообщают, Китай работает в своей программе по модернизации³¹.

³¹ На веб-сайте Jane's (14 июля 2004 г.) сообщается, что трехступенчатая твердотопливная ракета DF-41 предназначена для замены DF-5A примерно в 2005 г.

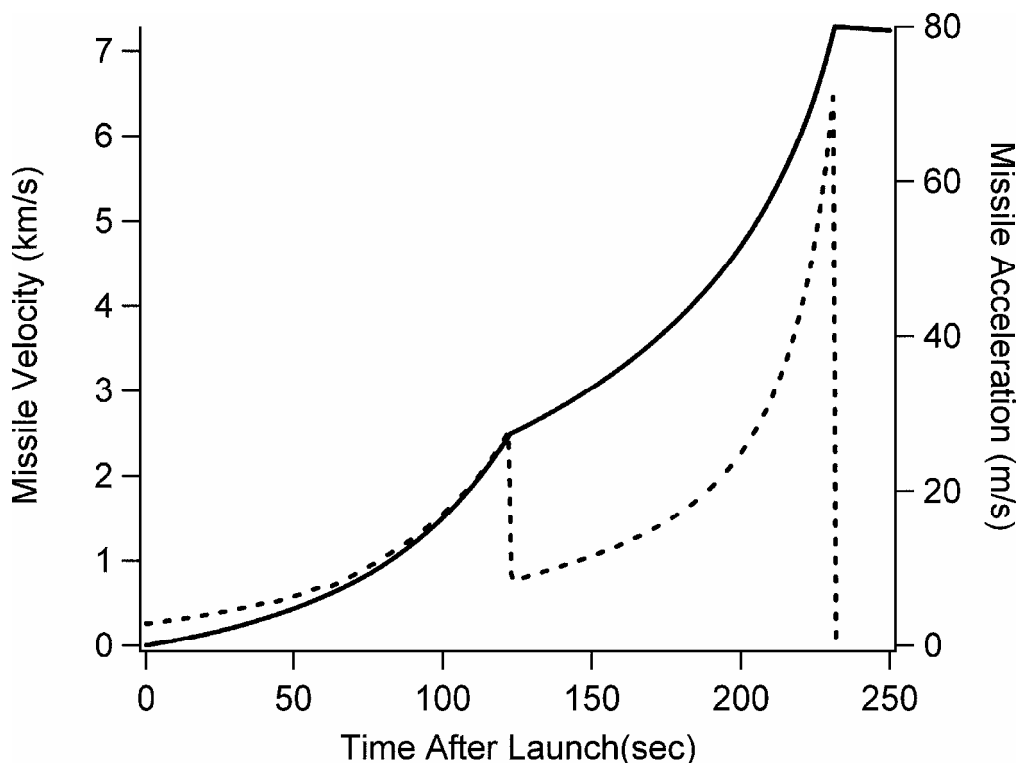


Рис. 13. Профили ускорения (штриховая кривая) и скорости (сплошная кривая) в компьютерном моделировании DF-5A, использованном в этой работе. Резкое увеличение ускорения примерно на 125-ой секунде соответствует изменению отношения масс после отделения от первой ступени и началу работы второй ступени. На горизонтальной оси показано время после запуска (в секундах), на левой вертикальной оси – скорость (в км/с), а на правой вертикальной оси – ускорение в (m/s^2).

Три спутника в группировке Бейдоу располагаются так, что они могут обеспечить достаточно точные измерения скорости ракеты, летящей от Ксюаньхуа (или Люонинга) до Вашингтона. Кроме того, из-за большого расстояния до геостационарной орбиты для угловых положений не требуется точного знания положения ракеты, которые входят в определение скорости ракеты из скалярных доплеровских измерений. (Например, знание положения ракеты с точностью ± 1 км, которое определено возможно, с учетом того, что известно о китайской технологии инерциальной навигации, будет давать угловую ошибку около 30 микро-радиан.) поэтому мы предполагаем, что доплеровские измерения скорости вдоль трех лучей зрения до трех спутников будут определять ошибку. Остается только получить оценку частоты, на которой работают спутники Бейдоу.

Ее можно оценить из сообщений³² о том, что навигационные спутники Бейдоу используют тот же базовый космический аппарат – физическую конструкцию, которая содержит служебные системы электропитания, связи, управления ориентацией, и т.п. – как и связной китайский спутник DFH-3, который работает на частотах от 4 до 6 гигагерц. (Эти сообщения также дают массу спутника DFH-3, равную 2200 кг, с учетом массы двигателя для выхода на орбиту и ее коррекции. Эта масса согласуется с Возможностями вывода ракеты-носителя спутника Бейдоу «Великий поход 3А»³³, которая может вывести на траекторию перехода на геостационарную орбиту 2600 кг.)

Доплеровское смещение дается формулой:

³² Mark Wade, Encyclopedia Astronautica, по адресу в Интернет <http://www.astronautix.com/craft/beidou.htm>.

³³ China Academy of Launch Vehicle Technology, *LM-3A User's Manual*, глава 1, стр. 1, доступно в сети Интернет по адресу <http://www.calt.com.cn/new/english/#> (14 июля 2004 г.).

$$f_d = f \frac{v}{c}$$

где f_d – доплеровское смещение, f – частота радиосигнала Бейдоу, v – скорость МБР по отношению к спутнику Бейдоу и c – скорость света. Чем больше частота передачи, тем больше доплеровское смещение и, следовательно, тем легче его обнаружить. Поскольку максимальная частота трансляции сигнала со спутника DFH-3 равна шести гигагерцам, но можем оценить, что доплеровское смещение равно 144 кГц при скорости в конце траектории 7,2 км/с. Конечно, реальные доплеровские смещения трех сигналов Бейдоу будут несколько меньше, поскольку лучи зрения не будут точно совпадать с направлением конечной скорости ракеты.

В предположении, что доплеровское смещение используется для формирования сигнала отсечки двигателей ракеты, система наведения и управления ракетой должна различать доплеровские частоты, которые соответствуют скоростям, отличающимся на требуемый предел ошибки скорости. Из рис. 12 можно видеть, что желаемое КВО в 500 метров соответствует ошибке скорости в 0,05 м/с. Это означает, что точность доплеровских измерений должна быть выше 1,1 Гц при полном смещении в 144 кГц, или, что более важно, несущей частоте в примерно шесть гигагерц.

Хотя в основном доплеровские смещения измеряются при прохождении сигнала через набор узкополосных фильтров³⁴, процесс можно рассматривать как сравнение длины волны приходящего сигнала с опорной длиной волны, в том случае, когда волна соответствует желаемой скорости. Для проведения хорошего сравнения наблюдатель должен позволить пройти большому количеству длин волн и затем измерить относительные фазы двух сигналов. Если приходящий сигнал отличается от опорного на 1,1 Гц, то наблюдатель должен подождать примерно $2,7 \cdot 10^9$ длин волн (на несущей частоте), прежде, чем относительная фаза достигнет половины длины волны. Это замет примерно секунду и эта величина станет временным масштабом для сравнения. (конечно, возможно, что для различения двух волн будет достаточно меньшей разности двух сигналов, и тогда потребуется пропорционально меньшее время.)

С другой стороны, ускорение ракеты DF-5, около 70 м/с² в момент отсечки двигателя, означает, что за полсекунды, необходимые для измерения с требуемой точностью, ракета изменит свою скорость на 35 м/с. Даже после выключения двигателя ракеты гравитационное поле Земли будет изменять скорость ракеты во время измерения примерно на 5 м/с, что примерно в 100 раз больше требуемой точности. Это делает использование группировки Бейдоу для определения момента отсечки двигателей непрактичным. Спутник Бейдоу может, конечно, сократить требуемое время передач на более высокой частоте, но потребуется частота примерно в 1000 гигагерц – намного больше, чем было продемонстрировано Китаем для передатчиков космического применения – для того, чтобы скорость менялась за время изменения на величину, сравнимую с точностью процесса измерения.

Другой возможный метод применения Китаем группировки Бейдоу для улучшения сил МБР заключается в использовании блока разведения для коррекции любой ошибки скорости, которая могла накопиться на активном участке. Это использует тот факт, что комбинация боеголовки и блока разведения следует кеплеровской траектории от выключения двигателя³⁵ до точки, в которой она входит в земную атмосферу, и тот факт, что в течение первых 27 минут траектории боеголовке видны все три спутника Бейдоу (см. рис. 14 для вида в направлении спутников до того, как они исчезнут за земным горизонтом). Кеплеровские траектории, в особенности пересекающие большие расстояния в межконтинентальном полете, драматически изменяются при небольших изменениях в начальной скорости. (Этот факт лежит в основе рассматриваемой здесь проблемы чувствительности точки падения.)

³⁴ George W Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, 1st Edition (El Segundo, CA: Hughes Aircraft Company), pp. 359-360.

³⁵ Используемая здесь компьютерная модель DF-5 показывает, что ракетный двигатель заканчивает работу на высоте 160 км, далеко за пределами эффективной земной атмосферы.

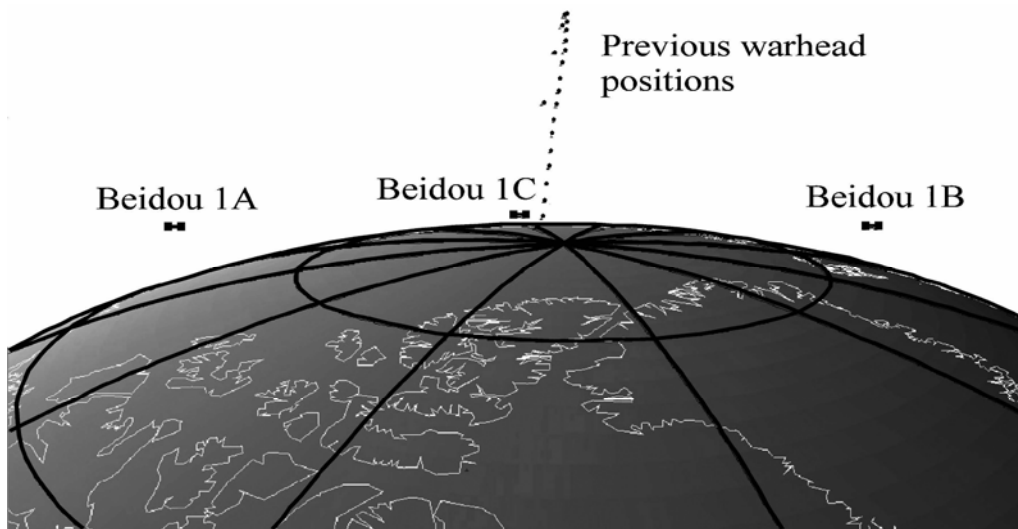


Рис. 14. Этот рисунок показывает вид со стороны боеголовки прямо перед тем, как спутник Бейдоу 1С исчезнет за земным горизонтом. Боеголовка находится над Канадой; Гренландию можно увидеть на правой стороне рисунка. Точками отмечены предыдущие положения боеголовки.

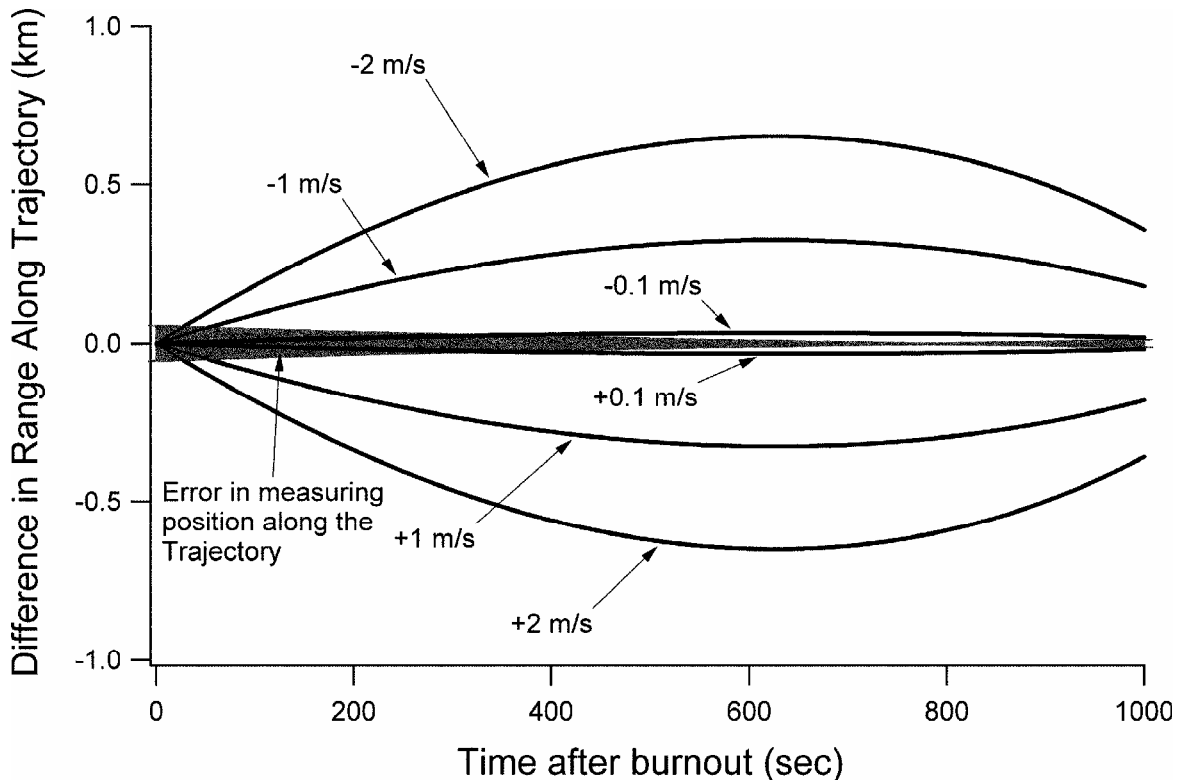


Рис. 15. Различия в дальности для боеголовки и блока разведки от номинальной траектории от Ксюаньхуа до Вашингтона в зависимости от времени после выключения двигателя. Непрерывная полоса представляет ожидаемую ошибку определения положения по группировке Бейдоу, спроецированную на направление мгновенной скорости боеголовки. Отметим, что ожидаемая ошибка по дальности достигает минимума вблизи положения максимальных разностей дальности. По горизонтальной оси отложено время после выключения двигателя (в секундах), а по вертикальной оси - разница в дальности вдоль траектории (в километрах).

Проведение повторных независимых измерений вдоль траектории поэтому может оказаться полезным для определения реальной скорости при отсечке двигателя и величины коррекции блоком разведки. Следует подчеркнуть, что эти измерения положения не предназначены для измерения положения блока разведки по отношению к определенной же-

лаемой траектории. Напротив, они предназначены для измерения разностей вдоль траектории реального полета и последующего определения скорости блока разведения.

На рис. 15 показаны разности в дальности движущейся по траектории комбинации боеголовки и блока разведения в зависимости от времени после выключения двигателя для нескольких траекторий, которые отличаются от номинальной по скорости на небольшую величину. Он показывает также ожидаемую ошибку положения для группировки Бейдоу вдоль проекции по скорости боеголовки для каждого момента. Интересно отметить, что ошибка в ожидаемой дальности достигает минимума примерно в то же время, когда разности в дальности становятся максимальными, примерно через 700 секунд после выключения двигателя. Можно построить аналогичные рисунки для отклонений положения, поперечных к номинальной траектории.

К сожалению, факторы, которые вносят вклад в ошибку, связанную с измерениями положения, не являются независимыми от предыдущих измерений. Например, ошибки, связанные орбитальными параметрами спутников не изменяются между измерениями. Это означает, что вдоль траектории не могут быть сделаны независимые измерения положения, улучшающие определение общей абсолютной траектории. Тем не менее, относительное положение каждой измеряемой точки может быть использовано для определения траектории по отношению к точке, абсолютное положение которой определяется наиболее точным измерением положения в ряде. Параметры траектории по отношению к этой опорной точке, с другой стороны, могут быть улучшены проведением многих независимых измерений. Этого достаточно для определения коррекции скорости с гораздо большей точностью, чем позволит любое одиночное измерение. Тем не менее, если Китай захочет подождать 500 секунд после выключения двигателя (или около 12 минут после запуска по 35-минутной траектории), ему может потребоваться сделать только несколько измерений положения для различия между траекториями с достаточной точностью, чтобы получить КВО в 500 метров, поскольку УГГ будет улучшаться.

Как может быть использована эта информация? После того, как будет сделана точная оценка скорости после выключения двигателя, движущийся блок разведения может сбросить показания своих гироскопов и акселерометров до положений и скоростей, определенных по системе Бейдоу. Это существенно уберет любые ошибки, которые накопились во время активного участка траектории. После этого блок разведения сможет либо скорректировать небольшие разности скорости – может потребоваться изменение всего в несколько метров в секунду – для нацеливания боеголовки на намеченную цель, либо блок разведения сможет проводить коррекцию несколько раз, полагаясь только на свою исправленную систему инерциального наведения, и сбросить несколько боеголовок на различные цели на своем пути – изменение нацеливания, облегчаемое близостью населенных центров на восточном побережье. Следует отметить, что Китай может испытать эту систему, используя ее для определения орбитальных параметров своих спутников на орбитах, близких к полярным.

Таким образом, хотя это и может показаться противоречащим интуиции, китайская группировка навигационных спутников Бейдоу предоставляет достаточную точность для наведения межконтинентальных баллистических ракет с ядерными боеголовками, но она недостаточно точна для обычных тактических вооружений.

КИТАЙСКАЯ ЯДЕРНАЯ ДОКТРИНА И СПУТНИКИ БЕЙДОУ

В этой статье была сделана попытка определения военных возможностей китайской спутниковой группировки Бейдоу. Однако, теоретические возможности не приводят автоматически к реальным мотивам. Возможно, что Китай запустил эту систему спутников в рамках гражданских программы исследований и разработок и не особенно заботится о том, что ее наземные возможности так ограничены. Тем не менее, полезность системы ограничена³⁶ из-

³⁶ Некоторые аналитики указывают, что объявленный режим работы не является реально ограниченным, поскольку предполагается, что в центре управления имеется подробная высокоточная цифровая карта высот всей покрываемой области (Дэвид Райт, частное сообщение). Однако, получение такой карты, хотя оно, конечно, возможно, требует больших затрат, и Китай заявил только, что система используется для «автомобильного и железнодорожного

за итеративной природы ее двухспутникового режима работы и ее точность ограничена наземным использованием трехспутникового режима. Из-за этого, и того факта, что система, как и любая космическая система, очень дорога, мы естественно перешли к предположениям о тех применениях, для которых она кажется хорошо приспособленной, в данном случае, к стратегическому использованию.

Многие аналитики считают, что Китай уже в течение долгого времени придерживается ядерной доктрины, базирующейся на задержанном ответном ударе³⁷. Политика основывается на обладании несколькими живучими ракетами, несущими ядерные боеголовки большой мощности, нацеленными на населенные центры. Для этого Китаю не нужна избыточная точность своих боеголовок. Например, боеголовка в 3 мегатонны, установленная сейчас, как сообщают, на DF-5A может обеспечить избыточное давление в 2 фунта на квадратный дюйм (0,15 атм) – достаточное для разрушения³⁸ бетонных или шлакоблочных стен и нанесения больших людских потерь – на радиусе в 19 км³⁹, намного большем, чем самые большие оценки КВО для DF-5A в 3 500 метров.

Даже если Китай модернизирует свои ядерные силы, как ожидают некоторые западные аналитики, включив разделяющиеся боеголовки и, следовательно, уменьшив их мощность для экономии веса, сомнительно, что Китаю понадобится увеличить точность своих ракет. Например, если Китай заменит свои большие мегатонные боеголовки на боеголовки диапазона 150 – 350 килотонн⁴⁰, эквивалентный радиус действия ударной волны сократится только до 7 км. Это все еще вдвое превышает самую большую оценку КВО для существующих ракет. Поэтому кажется сомнительным, что Китаю потребуется дорогостоящая космическая навигационная система для своей программы ядерной модернизации, если она сохранит свой противощенностный подход к сдерживанию, а не будет отвечать на некоторые другие изменения стратегического окружения.

Еще менее вероятно, что Китай перейдет на противосиловую стратегию или обезглавливающий удар по командным центрам управления. Ядерные силы Соединенных Штатов достаточно велики, чтобы пережить первый ядерный удар от бывшего Советского Союза, у которого было намного больше ядерного оружия, чем Китай может надеяться произвести в обозримом будущем. Гораздо более вероятным объяснением будет то, что Китай будет использовать систему с разделяющимися боеголовками для того, чтобы угрожать дополнительным американским городам. Ограниченная космическая навигационная система с точностями, предоставляемыми в настоящее время группировкой Бейдоу, может внести заметный вклад в эту программу модернизации. Более того, такую систему можно рассматривать как отклик на предлагаемую Соединенными Штатами наземную систему противоракетной обороны, поскольку она приспособлена для маневрирования вблизи средней точки траектории, после того, как был запущен американский перехватчик.

Приложение

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОШИБОК, СВЯЗАННЫХ С ГРУППИРОВКОЙ ИЗ ТРЕХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

транспорта и прибрежных операций», что подразумевает, что у них нет такой карты для всей покрываемой области, и такие карты имеются только для их дорожной системы и железнодорожных путей. В прибрежных операциях, конечно, можно точно предполагать уровень моря для их ограничений по высоте. В этом смысле объявленный режим работы представляется ограниченным.

³⁷ На сайте The Nuclear Threat Initiative (14 июля 2004 г.) <http://www.nti.org/db/china/doctrine.htm> приводится краткое описание ядерной доктрины Китая, включая веб-адреса нескольких китайских официальных документов.

³⁸ Samuel Glasstone, ed., *The Effects of Nuclear Weapons*, The United States Atomic Energy Commission, Revised Edition, February 1964, p. 163.

³⁹ Этот и несколько других ядерных эффектов были рассчитаны при помощи компьютера эффектов ядерного оружия, включенного в книгу Глэсстона *The Effects of Nuclear Weapons*.

⁴⁰ Китай испытал несколько конструкций ядерных зарядов в этом диапазоне между 1966 и 1983 г.г., согласно веб-сайту Jane's, www.janes.com, см. CSS-4 (DF-5), (14 июля 2004 г.).

Стурза⁴¹ начинает с определения разностей псевдодальностей (заданных разностью времени между местным временем пользователя и местным временем, передаваемым спутником, как оно было получено пользователем), ρ , между каждым спутником и пользователем:

$$\vec{\rho} = H_3 \vec{x} + b \vec{1}$$

где H_3 – это матрица, содержащая направляющие косинусы от пользователя до каждого спутника. Здесь

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}$$

расстояние между пользователем и гипотетической точкой, положение которой предполагается известным,

$$\vec{\rho} = \begin{bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \Delta \rho_3 \end{bmatrix}$$

вектор разностей псевдодальностей,

$$H_3 = \begin{bmatrix} \alpha_{1x} & \alpha_{1y} & \alpha_{1z} \\ \alpha_{2x} & \alpha_{2y} & \alpha_{2z} \\ \alpha_{3x} & \alpha_{3y} & \alpha_{3z} \end{bmatrix}$$

матрица направляющих косинусов, и b – смещение часов пользователя.

После этого поправка к положению пользователя дается выражением

$$\vec{x} = H_3^{-1} [\vec{\rho} - b \vec{1}]$$

Для этого анализа более важна ковариация ошибки коррекции положения, задаваемую выражением:

$$\text{cov}(\vec{x}) = H_3^{-1} \left[\sigma_\rho^2 I + \sigma_b^2 \vec{1} \vec{1}^T \right] H_3^{-T} + \sigma_\rho^2 \left\{ (H_3^T H_3)^{-1} + \frac{\sigma_b^2}{\sigma_\rho^2} H_3^{-1} \vec{1} \vec{1}^T H_3^{-T} \right\}$$

где σ_b^2 – вариация ошибки смещения часов пользователя.

⁴¹ Mark A. Sturza, "GPS Navigation Using Three Satellites and a Precise Clock," *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, vol. 30 (1983), pp. 146-156.

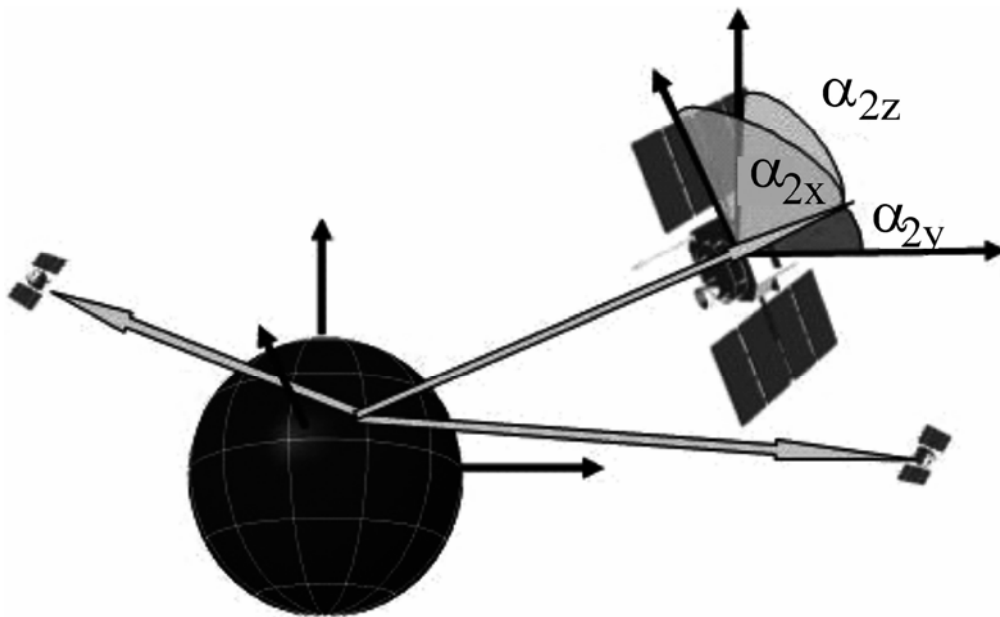


Рис. П-1. Векторы от пользователя к каждому из трех спутников группировки Бейдоу показаны как два из трех направляющих косинусов углов для (произвольно пронумерованного) спутника 2. Используется стандартная система координат с осью X, направленной вдоль основного меридиана, и осью Z, направленной к северному полюсу. Отметим, что направление направляющих косинусов соответствует направлению от пользователя к спутнику.

В оставшейся части статьи мы будем предполагать, что вариация ошибки смещения часов пренебрежимо мала по сравнению с ошибкой, связанной с псевдодальностью, т.е. $\sigma_b^2 \ll \sigma_p^2$. При этом упрощающем предположении ковариация ошибки положения, связанная с системой трех спутников и пользователем будет даваться выражением:

$$\text{cov}(\vec{x}) = \sigma_p^2 (H_3^T H_3)^{-1}$$

Таким образом, ошибка представляется в виде произведения двух членов: первый определяется просто геометрией группировки – как ее видит пользователь – а второй является комбинацией всех других факторов, связанных со всей космической навигационной системой, как это отмечалось ранее. Полезно рассматривать геометрический множитель отдельно; его нередко называют «геометрическим уменьшением точности», и разделяют полный геометрический множитель, в соответствии с выражением:

$$GDOP_3 = \sqrt{\text{Trace}(H_3^T H_3)^{-1}} = \sqrt{V_x + V_y + V_z}$$

Горизонтальное и вертикальное уменьшение факторов точности задается преобразованием матрицы направляющих косинусов в систему координат пользователя с координатами X и Y, лежащими в плоскости, касательной к земной поверхности в этой точке, и осью Z, направленной по радиусу. Следовательно:

$$HDOP_3 == \sqrt{V_x + V_y}$$

и

$$VDOP_3 == \sqrt{V_z}$$

для горизонтального и вертикального уменьшения факторов точности, соответственно.