

ПРАКТИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ АВТОНОМНЫХ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ ПОД ПОЛОГОМ ДРЕВОСТОЯ

In this article, the problem of the accuracy and precision of autonomous GPS measurement by receiver Trimble R3 under forest canopy is addressed. Position accuracies and precisions were determined for a total of 24 vertices. Each vertex was visited to collect 25 position fixes. Mean accuracy was 4,0 meters and the precision – 3,7meters. Standard deviation of relative error of perimeter and area estimate was calculated. Standard deviation of relative error of perimeter estimate decreased from 1,7% to 0,1% with augmentation of area from 0,5 to 5 hectare. The same measure reduced for area from 8,4% to 0,6% with increasing of area from 0,5 to 5 hectare. Some ways of augmentation of the accuracy and the precision of autonomous and differential phase GPS measurements were proposed.

Введение. Руководства пользователя и рекламные проспекты GPS-приемников содержат информацию о точности позиционирования в условиях отсутствия помех радиосигналам от спутников. Однако большинство сфер применения предполагает измерение в неблагоприятных условиях, например под пологом древостоя, в условиях холмистого рельефа либо в неблагоприятных погодных условиях. Известно, что древесный полог отрицательно сказывается на точности GPS-позиционирования из-за ослабления GPS-сигнала [1–7]. Данный эффект более выражен в хвойных насаждениях, чем в лиственных [3]. Исследования также показывают, что фактор падения точности PDOP (Position Dilution of Precision), являющийся наиболее признанным критерием качества геометрии созвездия спутников, а следовательно, и точности GPS-позиционирования, больше под пологом древостоя. Во многих исследованиях показана эффективность автономной и дифференциальной GPS-съемки в лесных условиях. По исследованиям Т. Йошимура [2] внутренняя и абсолютная точность в плане автономных GPS-измерений в лесу варьируется в пределах 2,16–6,79 м и 3,26–6,19 м соответственно. Н. М. Холдэн [6] оценил абсолютную и внутреннюю точность позиционирования под пологом древостоя и рассмотрел взаимосвязь между точностью съемки, PDOP и сомкнутостью полога. Это исследование также показало, что внутренняя и абсолютная точность DGPS-съемки увеличивается со снижением сомкнутости полога, а также, что использование PDOP в качестве единственного критерия точности позиционирования предоставляет ненадежную информацию [8]. Среднеквадратическое отклонение абсолютной плановой точности DGPS-позиционирования в лесных условиях по исследованию данного автора лежит в пределах 0,5–9,7 м. Более того, точность значительно увеличивается при увеличении числа последовательных наблюдений [1, 3, 5]. Был сделан вывод, что приблизительно от 60 [9] до 300 [8] статически полученных измерений необходимо для получения надежной (достоверной) точно-

сти. Все исследования показывают большую вариацию точности в зависимости от типа используемой аппаратуры [10, 11]. Э. Наэссет [7] показал, что абсолютная точность GPS-позиционирования 6-канальным приемником ниже, чем 12-канальным, выше при комбинированном применении кодовых и фазовых измерений, чем при использовании только кодовых. Я. Тачики [10] оценил эффективность позиционирования в динамическом режиме, сравнив абсолютные и внутренние ошибки автономного и дифференциального позиционирования 2 GPS-приемников навигационного и топографического класса. Э. Наэссет [7] рассматривал влияние таксационных характеристик древостоя на внутреннюю и абсолютную ошибку GPS-съемки и оценил факторы, влияющие на нее с использованием множественного регрессионного анализа. К. Д. Лиу [12] показал влияние селективного доступа на внутреннюю и абсолютную точность GPS-съемки.

В представляемом ниже исследовании были проведены полевые опыты для определения плановой точности в лесных условиях, определены и сравнены абсолютная и внутренняя ошибки GPS-позиционирования, рассчитана среднеквадратическая ошибка (СКО, %) вычисления периметра и площади, прослежена зависимость 2 последних показателей от размера участка.

Объекты и методы исследования. Для определения точности GPS-позиционирования в лиственном и хвойном древостоях Центрального лесничества Негорельского учебно-опытного лесхоза были созданы 2 опытных участка прямоугольной формы размером приблизительно 250×200 м и площадью около 5 га. Рельеф участков равнинный. Полнота смешанного елово-соснового древостоя на пробном участке 1 находится в пределах 0,8–0,9. Средний возраст – 80 лет. Пробный участок 2 представляет собой смешанный елово-березовый ольс с полнотой 0,8–0,9 и средним возрастом 70 лет.

Вдоль длинных сторон каждого участка на визире через 50 м были закреплены колышками точки съемки. Точки съемочного обоснования

были заложены на вблизи прилегающем поле, координаты их определены в результате быстростатической GPS-съемки с ошибкой около 4 мм приемником Trimble R3. От точек съемочного обоснования по точкам GPS-позиционирования 1-го и 2-го участков тахеометром Trimble M3 был проведен ход и определены координаты вершин полигонов. Абсолютная линейная невязка составила 11,9 и 9,2 см в первом и втором случае соответственно на ~1100 м хода, т. е. относительная ошибка менее 0,0001. Данный факт свидетельствует о том, что координаты вершин участков определены с ошибкой около 1 см.

Получение и обработка GPS-данных. GPS-съемка автономным методом производилась приемником Trimble R3. Паспортная точность прибора при дифференциальных кодовых наблюдениях – менее 3 м с вероятностью 99,7%. Приемник имеет встроенную систему подавления многолучевости радиосигналов и таким образом наилучшим образом отвечает условиям лесной съемки. На каждой точке получали 25 отсчетов (эпох). Измерения выполнялись в различные дни и время суток. Планирование эксперимента с целью определения наиболее благоприятного для съемки времени суток не осуществлялось. Рекомендуемые производителем настройки граничного значения PDOP, SNR (Signal to Noise Ratio – отношение сигнал/шум) и маски угла возвышения не изменялись и равнялись 6, 40 дБ и 15° соответственно. Количество видимых спутников во время съемки в среднем было 5,6 и 6,5 соответственно для 1-го и 2-го участков, а PDOP – 4,5, что указывает на удовлетворительные условия съемки. Данные автономных наблюдений были переданы на ПК в текстовом формате и обработаны в MS Excel.

Абсолютная и внутренняя точность в плане. Для определения ошибок позиционирования была рассчитана абсолютная и внутренняя точность. В данном исследовании под абсолютной точностью понимается отклонение выборочного среднего полученных координат от истинного положения, вычисляется по формуле (1). Внутренняя точность – это величина, показывающая, как далеко GPS-точки расположены от среднего значения координат, которая рассчитывается по формуле (2). Пояснение данных показателей представлено на рис. 1.

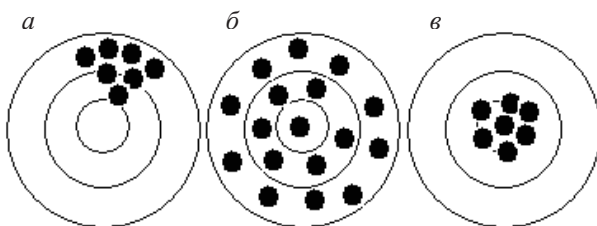


Рис. 1. К пояснению абсолютной и внутренней точности

Центр мишени указывает истинное значение координат, а точки – значения координат, полученные в результате GPS-съемки. На рис. 1, а изображен случай высокой внутренней точности и низкой абсолютной точности, на рис. 1, б – обратная ситуация. Случай высокой абсолютной и внутренней точности изображен на рис. 1, в.

Абсолютная $\sigma_{H accuracy}$ и внутренняя $\sigma_{H precision}$ точность вычисляются, исходя из следующих выражений:

$$\sigma_{H accuracy} = \sqrt{(\bar{x} - x_{true})^2 + (\bar{y} - y_{true})^2}; \quad (1)$$

$$\sigma_{H precision} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}, \quad (2)$$

где \bar{x} , \bar{y} – среднее значение координат x и y соответственно; x_{true} , y_{true} – истинное значение координат x и y соответственно; σ_x , σ_y – среднеквадратическое отклонение значений координат x и y соответственно, рассчитываемое по формулам

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n-1}; \quad (3)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (4)$$

x_k , y_k – значения координат x и y для k -й эпохи (отсчета) соответственно; k – номер эпохи; n – общее количество наблюдений на точке.

По координатам вершин полигонов рассчитаны площадь и периметр участков различной формы площадью от 0,5 до 5 га с градацией 0,5 (всего 269 значений) и сравнены с теоретическими значениями.

Результаты и обсуждение. Ошибки позиционирования в плане. Абсолютная и внутренняя точность в плане автономной GPS-съемки под пологом древостоя на участках 1 и 2 представлена в таблице. Большие ошибки позиционирования возникают в связи с ослаблением либо прерыванием спутникового радиосигнала при его прохождении через полог древостоя, а также в связи с возникновением эффекта многолучевости из-за переотражения сигнала различными объектами, например стволами деревьев.

Как видно из таблицы, абсолютная точность автономной GPS-съемки в плане на участке 1 лежит в пределах 1,1–8,2 м, а на участке 2 – 1,7–11,2 м. Внутренняя точность в плане на участке 1 изменяется в пределах 1,2–8,6 м, а на участке 2 – 1,3–8,4 м.

Средняя абсолютная точность позиционирования на обоих участках практически не отличается и примерно равна 4 м. Средняя внутренняя точность на обоих участках равняется 3,7 м.

Абсолютная и внутренняя точность автономного GPS-позиционирования под пологом древостоя, м

Показатель	Номер точки											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Пробная площадь 1												
$\sigma_H accuracy$	3,7	2,6	5,4	4,9	3,3	5,1	4,2	3,6	1,1	1,6	5,9	8,2
$\sigma_H precision$	1,4	1,2	1,6	8,6	5,2	3,5	2,6	4,7	2,7	2,1	2,3	7,5
Пробная площадь 2												
$\sigma_H accuracy$	3,0	2,5	2,3	1,7	3,9	2,4	1,8	2,4	11,2	8,5	5,2	2,7
$\sigma_H precision$	2,8	3,1	1,3	2,6	8,4	1,5	7,3	1,8	4,1	7,1	2,2	2,5

Ошибка определения периметра и площади. Точность определения периметра участка, несомненно, зависит от точности GPS-позиционирования [10]. Чем выше точность позиционирования, тем ниже ошибка оценки периметра и площади полигона. Ошибки определения площади и периметра подчиняются закону нормального распределения [13], поэтому оценку точности определения площади и периметра целесообразно производить с использованием СКО.

На рис. 2 представлена зависимость среднеквадратической ошибки определения периметра участка прямоугольной формы от его величины. При изменении площади участка от 0,5 до 5 га, СКО определения периметра для пробы 1 снижается с 1,7 до 0,1%, а для пробы 2 – с 1,1 до 0,1%.

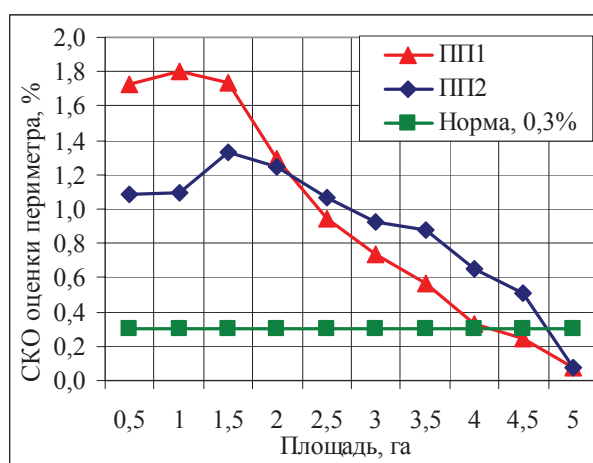


Рис. 2. Зависимость СКО оценки периметра от величины участка при автономной GPS-съемке

Зависимость точности определения площади участка от его величины представлена на рис. 3. При увеличении площади участка с 0,5 до 5 га, СКО определения площади изменяется с 8,4 до 0,6% для участка 1, а для участка 2 – с 6,7 до 0,7%.

Представляет интерес сравнить полученные ошибки с нормами точности буссольной съемки.

Как показано на рис. 2, в случае площадей менее 4 га СКО оценки периметра при GPS-съемке на участке 1 превышает нормативные требования к величине абсолютной невязки буссольного хода [14]. Ввиду отсутствия в ис-

точнике [14] нормативной точности определения площади при буссольной съемке, полученные значения были сравнены с аналогичным критерием Рослесхоза [15]. Нормативная ошибка определения площади аналитическим путем при буссольной съемке (при условии точности определения длин линий – 1:300, а горизонтальных углов – 10') составляет 0,5% и несколько ниже значений, полученных по результатам GPS-измерений (рис. 3). Противоречие, полученное нами при использовании критериев точности определения периметра и площади для буссольной съемки, указывает на то, что их использование не совсем корректно для оценки ошибки GPS-съемки.

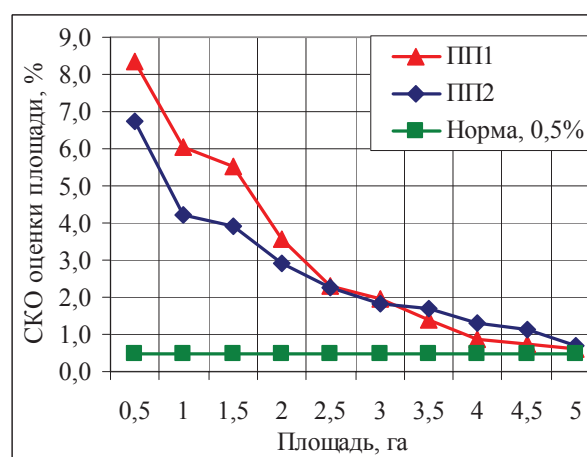


Рис. 3. Зависимость СКО оценки площади от величины участка при автономной GPS-съемке

Указанные нормативы неправомерно использовать потому, что GPS-приемник непосредственно длины линий и горизонтальные углы не измеряет. По результатам наблюдения за спутниковым созвездием приемник вычисляет значения координат, а длины линий и горизонтальные углы в свою очередь могут быть получены косвенно путем расчета по известным формулам. Ошибка определения периметра (абсолютная линейная невязка) и площади при автономных GPS-измерениях может быть получена не иначе, как путем сравнения с результатами классической геодезической съемки.

В качестве показателя точности и надежности данных, получаемых в результате автоном-

ного спутникового позиционирования, можно использовать среднеквадратическое отклонение, вычисляемое по формуле (2).

Выводы. Критерии точности для буссольной и теодолитной съемки, указанные в источнике [14] не совсем корректно использовать для оценки точности GPS-съемки, т. к. приемник непосредственно длины линий и горизонтальные углы не измеряет. В качестве критерия точности автономного и относительного спутникового позиционирования можно использовать внутреннюю точность (СКО).

Полученная нами ошибка оценки площади при GPS-измерениях составляет от 8,4 до 0,6% для участков площадью от 0,5 до 5 га соответственно, что в лучшем случае на 0,1% выше нормативной.

Относительная ошибка оценки площади участка зависит от его величины и абсолютной точности определения координат вершин.

Дальнейшие пути повышения абсолютной и внутренней точности при GPS-съемке:

1) получение и округление большего количества автономных наблюдений [1, 8, 9];

2) использование специальных алгоритмов осреднения автономных данных и протоколов съемки [1, 6];

3) использование дифференциального режима, что позволит повысить абсолютную точность до 1 м и выше [1–10];

4) применение относительных измерений, точность которых методов зависит от многих факторов, но обычно находится на субсантиметровом уровне [7];

5) планирование времени проведения съемки.

К наиболее простым методам повышения точности GPS-измерений в лесных условиях можно отнести указанные в пунктах 1 и 2. Применение дифференциального режима и относительных измерений несколько сложнее, т. к. предполагает обработку собранных данных специальным программным обеспечением, а также наличие персонала соответствующей квалификации.

Литература

1. Piedallu, C. Effects of forest environment and survey protocol on GPS accuracy / C. Piedallu, J. Gegout. // *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* – 2005. – Vol. 9. – P. 1071–1078.

2. Yoshimura, T. Comparing the precision and accuracy of GPS positioning in forested areas / T. Yoshimura, H. Hasegawa // *J. For. Res.* – 2003. – Vol. 8. – P. 147–152.

3. Deckert, C. Forest canopy, terrain, and distance effects on global positioning system point

accuracy / C. Deckert, P. V. Bolstad // *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* – 1996. – Vol. 3. – P. 317–321.

4. Liu, C. J. Using differential GPS for forest traverse surveys / C. J. Liu, R. Brantigan // *Can. J. For. Res.* – 1995. – Vol. 11. – P. 1795–1805.

5. Naesset, E. Assessing point accuracy of DGPS under forest canopy before data acquisition, in the field and after postprocessing / E. Naesset, T. Jonmeister // *Scand. J. Forest. Res.* – 2002. – Vol. 4. – P. 351–358.

6. Holden, N. M. A method for relating GPS performance to forest canopy cover / N. M. Holden [et al.] // *Int. J. For. Eng.* – 2000 – Vol. 2. – P. 51–56.

7. Naesset, E. Point accuracy of combined pseudorange and carrier phase differential GPS under forest canopy / E. Naesset // *Can. J. For. Res.* – 1999. – Vol. 29. – P. 547–553.

8. Sigrist, P. Impact of forest canopy on quality and accuracy of GPS measurements / P. Sigrist, P. Coppin, M. Hermy // *Int. J. Rem. Sens.* – 1999. – Vol. 18. – P. 3595–3610.

9. Sawaguchi, I. Positioning precision and sampling number of DGPS under forest canopies / I. Sawaguchi [et al.] // *J. For. Res.* – 2003. – Vol. 8. – P. 133–137.

10. Tachiki, Y. Effects of polyline simplification of dynamic GPS data under forest canopy on area and perimeter estimations / Y. Tachiki [et al.] // *J. For. Res.* – 2005. – Vol. 10. – P. 419–427.

11. Wing, M. G. Consumer-grade Global Positioning System (GPS) accuracy and reliability / M. G. Wing, A. Eklund, L. D. Kellogg // *J. For.* – 2005. – Vol. 4. – P. 169–173.

12. Liu, C. J. Effects of selective availability on GPS positioning accuracy / C. J. Liu // *Southern Journal of Applied Forestry.* – 2002. – Vol. 3. – P. 140–145.

13. Инженерная геодезия: учеб. пособие для вузов / Е. Б. Ключин [и др.]; под общ. ред. Д. Ш. Михелева. – 4-е изд. – М.: Академия, 2004. – 480 с.

14. Правила по отводу и таксации лесосек в лесах Республики Беларусь: ТКП 060-2006 (02080). – Введ. 29.12.06. – Минск: Минлесхоз, 2006. – 66 с.

15. Приказ Рослесхоза от 22.09.1999 № 186 об утверждении отраслевого стандарта ОСТ 56-109-99 «Работы геодезические. Таксация и лесоустройство. Лесохозяйственное производство. Нормы точности. Методы выполнения измерений» // Федеральная служба лесного хозяйства России [Электронный ресурс]. – 1999. – Режим доступа: <http://infopravo.by.ru/fed1999/ch03/akt15131.shtml>. – Дата доступа: 24.02.2009.