

THE TERRESTRIAL LASER SCANNING RESOURCES AS A BASIS FOR GEODESIC MODELING

Yasen T. Prokopov

jasen_prokopov@abv.bg

Summary: *Laser scanning is a remote monitoring technology that allows obtaining a 3D model of the surveyed object.*

It can be used in solving a wide range of problems that require geospatial data, in the study and forecasting in the area of geodesy, geology, mining, etc., becoming a high accuracy powerful tool for topographic and morphological research.

Key words: *scanner, georeferencing, mobile scanning, monitoring, modeling.*

ВЪЗМОЖНОСТИТЕ НА НАЗЕМНОТО ЛАЗЕРНО СКАНИРАНЕ – ОСНОВА ЗА ГЕОДЕЗИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ

Ясен Тр. Прокопов

jasen_prokopov@abv.bg

РЕЗЮМЕ

Лазерното сканиране е технология за дистанционно наблюдение, която позволява получаване на 3D модел на заснеманите обекти.

Прилага се при решаване на широк кръг от задачи, за които са нужни геопространствени данни, при изучаване и прогнозиране в геодезията, геологията, минното дело и др., превръщайки се в мощен инструмент за топографски и морфологични проучвания с висока точност.

Ключови думи: *скенер, геореферирание, мобилно сканиране, мониторинг, моделизация*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Моделът е средство за познание на обективната действителност и може да се използва в различни области от науката и живота. Математическите модели на части от земната повърхност стоят в основата на *геодезическото моделиране*, което се характеризира с някои специфични особености - генерализация на формата, селектиране на информацията, голямо и приоритетно значение на символиката и формализиране на изходната информация [1].

Геодезическите модели съдържат и определят пространствено голям обем информация с различен характер, която се използва за проектиране и устройство на територията, при юриди-

чески проблеми по отношение на собствеността, научни и практически изследвания, за военни цели и др.

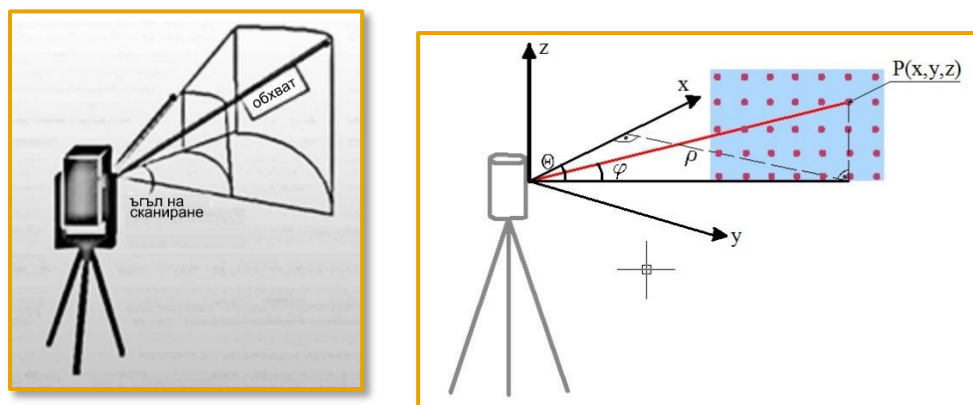
Пространствената моделизация на терена с наземни методи за лазерно сканиране е модерен начин за възпроизвеждане на естествената повърхност на Земята с висока точност и почти пълна автоматизация [3].

Наземното лазерно сканиране (TLS - Terrestrial Laser Scanning), популярно още и като **технология LiDAR** (Light Detection and Ranging), се използва за проследяване на деформации и премествания (движения) на земната повърхност и обекти върху нея във времето и пространството за нуждите на географията, геоморфологията, сеизмологията, физиката на атмосферата, археологията, изучаването на свлачища, земни пукнатини, закрити пространства и др [9].

2. СЪЩНОСТ НА НАЗЕМНОТО ЛАЗЕРНО СКАНИРАНЕ

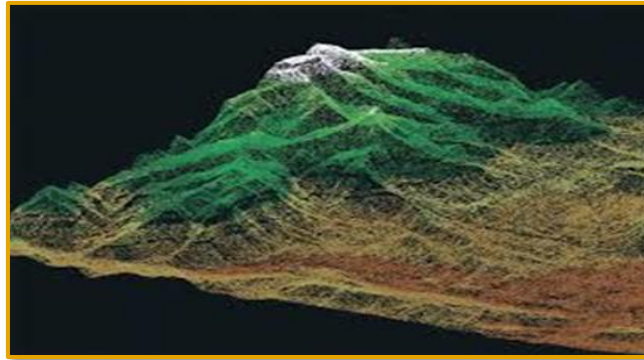
Първоначалното използване на LiDAR започва през 60-те години на миналия век в проучвания на атмосферата и на някои геоложки образувания. Подходът е идентичен като при сонарите и радарите, но се използва насочен сноп светлина. Обикновено се излъчват лазерни импулси към даден обект и се приемат от фотодетектор отразените от повърхността му сигнали, като заедно с това се извършва и точно измерване на времето за достигането им до обекта и обратно, чрез което се определя разстоянието до него, скоростта му на движение, и някои негови качествени характеристики. Основният принцип на работа на лазерния скенер не се отличава от принципа на измерване с безрефлекторната тотална станция. При известна стойност на хоризонтална посока (спрямо дадена точка) и известна стойност на зенитния ъгъл могат да бъдат изчислени пространствените координати - правоъгълни или полярни на всяка заснета точка [4], [5].

Скенера излъчва лазерен сноп лъчи, покривайки повърхността, попадаща в неговия обхват, което лесно се постига чрез свободното ротиране в две направления (чрез въртящи огледала и/или сервомеханизми). Сканираното изображение се създава чрез мрежа от точки с еднакво разстояние помежду им (еднаква ъглова стъпка) (фиг. 1).



Фиг. 1

Системата за лазерно сканиране осигурява *безпрецедентна плътност на геопространствена информация*, чрез набор от триизмерни вектори насочени към точки от повърхността, спрямо местоположението на скенера. Характерна за този вид измерване е бързината на сканиране (стотици хиляди точки в секунда). В резултат на това се получава т. нар. “3D облак” от точки, който се характеризира с висока точност (2-10 mm), висока прецизност (3-15 mm разстояние между точките) и ниско ниво на шум, осигурявайки геометрията на обекта. Особено предимство е и интуитивността на данните, като всяка точка може да съдържа реален цвят, което превръща данните от сканиране в лесно разпознаваеми и разбираеми (фиг. 2).



Фиг. 2

3. ОБХВАТ, ВЪЗМОЖНОСТИ И РЕАЛИЗАЦИЯ

Наземните лазерни скенери са безконтактни измервателни устройства, които, за да създават плътни облаци от точки, имат възможност за завъртане с различен **обхват около двете оси V и H** - съответно 360° и 270° (дори 320°).

В измерването на единична точка освен разстоянието до нея и сканиращите ъгли, за качеството от значение е и интензитетът I на отразения сигнал. След обработката всяка точка получава X , Y и Z координати, както и цветови нюанс. **Връзката** между сферичните и пространствените координати се дава с изразите [7]:

$$\begin{aligned} X_i &= \rho_i \cos \varphi_i \cos \theta_i \\ Y_i &= \rho_i \cos \varphi_i \sin \theta_i \\ Z_i &= \rho_i \sin \varphi_i \end{aligned} \quad i=1 \dots n \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \theta_i &= \tan^{-1} \frac{Y_i}{X_i} \\ \varphi_i &= \tan^{-1} \frac{Z_i}{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2}} \\ \rho_i &= \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2} \end{aligned} \quad i=1 \dots n \quad (2)$$

където φ и θ са съответно полярните ъгли на сканиращия лъч спрямо хоризонталната и вертикалната равнина (фиг.1), а ρ е наклоненото разстояние.

Качеството на отразения сигнал може да се даде с цвета на пиксела в тонове на сивото (**grayscale**), което улеснява дешифрирането:

- при силно отразяващи повърхности - светлосив пиксел;
- при силно абсорбиращи - тъмносив пиксел;
- при липсата на отражение - черен пиксел.

Сканираното изображение има възможност за съчетаване с фотографско изображение с висока резолюция, което да даде реалните цветове на заснемания обект [6]. На практика в повечето случаи е невъзможно да бъде обхванат обекта с еднократно сканиране, поради което то се извършва от няколко станции, а изображенията се привързват.

Според принципа за измерване на разстоянието лазерните скенери се разделят на:

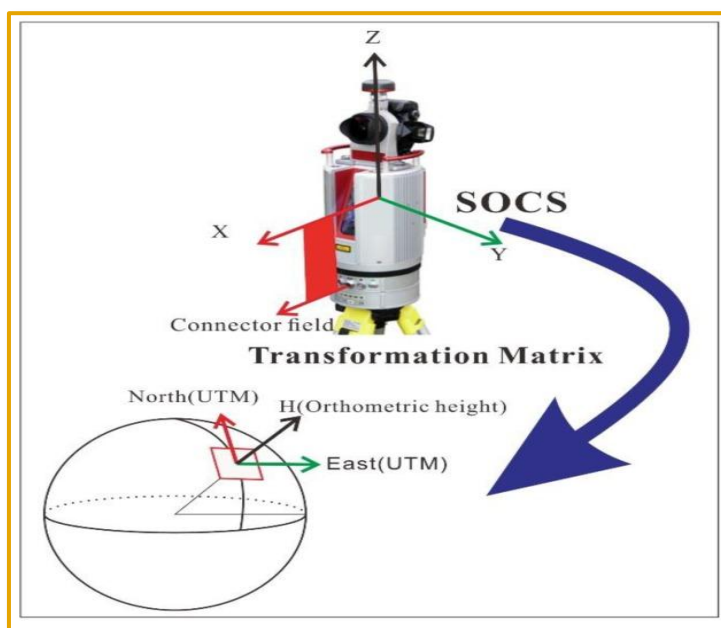
- импулсни;
- фазови.

Разстоянието до обекта се определя в зависимост от начина за определяне на времето за разпространение на сигналите по класическата схема на далекомерните измервания - чрез инди-

катор за време при ипулсните (използват се за определяне на средни и дълги разстояния - от стотици m до няколко km) и чрез фазовата разлика при фазовите (най-често до 150 m).

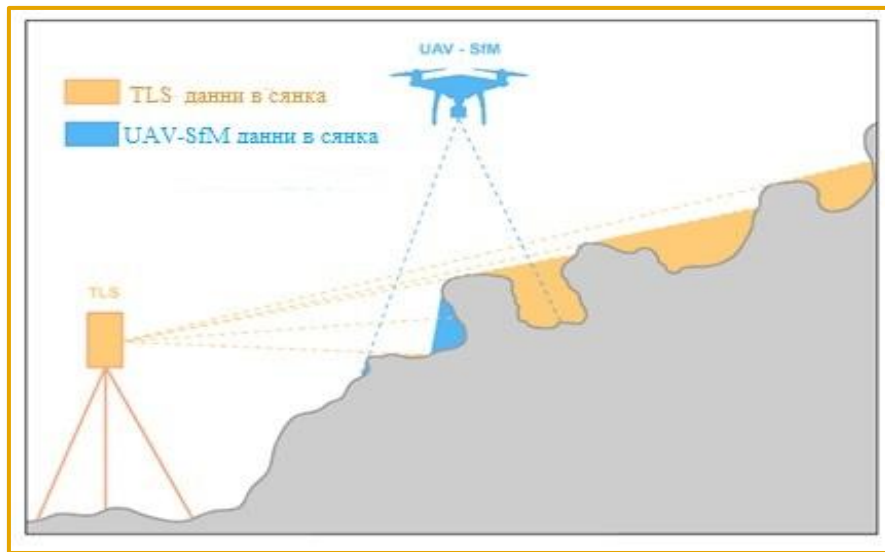
Фазовите лазерни скенери, които имат по-висока разделителна способност и точност, излъчват непрекъсната амплитудно модулирана вълна, при това често комбинация от няколко различни дължини на вълната. Най-късата дължина на вълната определя точността, която може да бъде постигната, а най-голямата премахва нееднозначността на измерванията. Разстоянието до обекта се определя чрез измерване на фазовото изместване между излъчения и отразения сигнал.

Създаването впоследствие на 3D модел на заснетия обект или територия минава през всички *етапи аналогични на изработването на числени модели*. Допълнителен етап тук е т. нар. **геореферирание** – процес, при който заснетите точки “заемат” своето географско положение върху земната повърхност, при това в единна референтна система [9] (фиг. 3). Окончателният тримерен модел на обекта се получава след комбиниране на всички изображения от отделните станции, където е извършено сканиране.



Фиг. 3 Координатни системи при геореферирането [9]
SOCS (Scanner’s Own Coordinate System) - координатна система на скенера

Лазерното сканиране може да бъде и във вариант въздушно, когато най-често скенерът е монтиран на борда на безпилотни летателни апарати (UAV - Unmanned Aerial Vehicle), като част от безпилотните самолетни системи (UAS - Unmanned Aircraft Systems). Обработката на изображенията със софтуера SfM (Structure from Motion) при тази технология гарантира висока надеждност, при сведени до минимум човешки грешки и значително по-малко време. В този случай максимално се допълва изображението заради местата попадащи в “сянка“ (фиг. 4).



Фиг. 4. Комбиниране на въздушно и наземно лазерно сканиране

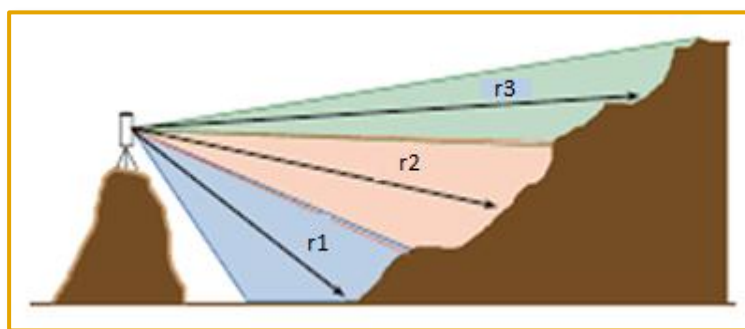
Лазерното сканиране е добра основа за проследяване при експлоатация на обекти, разработвани по открит способ в минното дело, а при по-висока резолюция лесно могат да се локализируют и зони с развитие на деформационни процеси (премествания).

4. ГРЕШКИ И ТОЧНОСТ ПРИ TLS ТЕХНОЛОГИЯТА. ТЕНДЕНЦИИ

При наземното лазерно сканиране, както и при голяма част от конвенционалните геодезически измервания, грешките, които се допускат са в няколко направления – **инструментални**, от **външните условия** и от **геометрията** (форма и характеристики на обекта) при реализацията на процеса.

Работата на скенера може да се окаже свързана с продължителен престой на едно място, което налага неговата *неподвижност и неизменно положение* – високата точност на генерирания модел зависи пряко от това. *Триногата* трябва да не е подложена на ъглови завъртания (ротации) и височинни промени (потъвания), заради опасността да се промени (наруши) координатната система на сензора.

Скенераът непрекъснато променя своето положение (завърта се), при което *ъгловата му стъпка* трябва да е съобразена с отдалечеността на обектите, заради разсейването на лазерния лъч. При по-къси разстояния сканирането се извършва с по-гъст облак от точки (по-голяма ъглова стъпка) и обратно при по-големи разстояния (фиг. 5).



Фиг. 5. Ъглова стъпка при лазерното сканиране

Точността при измерванията зависи преди всичко от **факторите**, които имат **пряко влияние**. Тъй като при наземното лазерното сканиране разстоянията се измерват безпризмено, трябва да се отчита *грапавостта на отразяващите повърхности* както и тяхната *отражателна способност* (албеда). Коефициентът на отражение е в пряка връзка с цвета – абсолютно черното тяло не отразява лазерните лъчи. Интензитетът на отразения сигнал зависи също и от *неравностите по терена* (интерференционен ефект) и *ъгъла на падане на лазерния лъч* (идеалния случай е перпендикулярното направление).

Косвено влияние върху измерванията (и то неблагоприятно) оказва наличието на *външни светлинни ефекти* – изкуствени светлинни източници, отблясъци и др. (може да се компенсира с нощни сканирания). *Състоянието на атмосферата* (вятър, влага, температура, атмосферно налягане) също е важен фактор, тъй като отразените сигнали затихват и нарушават формата си в резултат на разсейването и абсорбцията. Наличието на водни капки във въздуха или върху рефлекторите поражда „шум“, който значително намалява точността на модела, което е основен недостатък, за разлика от ГНСС технологията. Макар и в по-малка степен влияят *температурата на повърхността на обекта* и свойствата на материалите в *неговия състав*.

Най-общо СКГ m_p в положението на отделна (дискретна) точка от сканирания обект се определя от формулата

$$m_p = \sqrt{m_{ск}^2 + m_{атм}^2 + m_{геом}^2 + m_{об}^2}, \quad (3)$$

където $m_{ск}$ е механичната грешка на скенера, $m_{атм}$ – влиянието на атмосферните фактори, $m_{геом}$ – грешката от геометрията на сканирането, а $m_{об}$ е общата грешка, предизвикана от специфичните особености на обекта [2].

При отчитане на горните фактори може да бъде постигната една по-висока точност при наблюдение на земната повърхност с технологията TLS. По отношение на времето, от което зависят разстоянията, порядъка е ns до μs (100 m сигнала изминава за 0.67 μs). При разделителна способност около 2-3 mm/50 m отделни (единични) точки могат да се определят с точност *до 10 mm по положение*, а разстоянията с грешка 2-5 mm при фазовите и 2-15 mm при импулсните лазерни скенери (може значително да се подобри посредством модулиране на честотата). Тази дистанционна технология се доближава по точност, обем на получената информация и производителност до фотограметричното заснемане, а бързината при сканирането със стотици хиляди точки за много кратко време е без конкуренция при 3D моделирането.

Сега наземното лазерно сканиране е особено актуално - стабилни фирми, качествени скенери, надежден софтуер, многофункционални стандарти. Много добро решение напоследък за неговата реализация е *мобилното сканиране*, базирано на едновременна локализация и изработване на картографски модел (SLAM – Simultaneous Localization And Mapping). А самата обработка и представяне на облаците от точки е във възможностите на почти всички използвани CAD системи.

TLS технологията, за разлика от други топографски и фотограметрични техники за изследване, представлява ефективно и бързо решение за получаване на икономични и точни модели на терена, които позволяват евентуалното откриване на деформация върху големи площи от земната повърхност, с много високо ниво на детайлност [8]. Тя не изисква директен контакт със сканирания обект, което прави TLS ефикасен инструмент за идентифициране на свлачища или други непристъпни области, при което точността е по-ниска за отделните точки, но позволява да се постигне *много по-подробно моделиране на цялата повърхност*.

От своя страна комбинацията от наземно лазерно сканиране и ГНСС предоставя изчерпателна информация и позволява постигане на напълно геореферирани набор от данни, отваряйки възможности за директни измервания на промени в състоянието на определени части/участъци от земната повърхност (деформации във времето и пространството).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геодезическото заснемане на земната повърхност стои в основата на изработването на геодезическите модели. Замяната на аналоговата (непрекъснатата) картина на местността с дискретен (точков) модел налага оптимизиране на местата и броя на местата, от които се заснема, както и на заснетите подробности. В този процес много пъти съществуващите модели просто се осъвременяват (т. нар. реамбулация), което доста се улеснява при наличието на числен модел на местността (ЧММ).

Наземното лазерно сканиране, като един вариант за технологично решение при геодезическото моделиране, позволява изработването на прецизни теренни модели, с много висока степен на подробност, върху значителни по своите размери площи. Плътността от милиони точки в 3D облака възпроизвежда много добре естествената земна повърхност, при високо ниво на автоматизация на процесите.

Необходимото време за заснемане е без аналог по отношение на другите методи, когато става дума за пространствено определяне на дискретни точки, при това стотици хиляди за час (изключителна ефективност!), а в много отношения точността е съпоставима с тази и на тоталните станции.

Голяма част от факторите, влияещи на точността, могат да бъдат ограничени или премахнати чрез избор на подходящо време за сканиране - формално това може да бъде през цялото денонощие - или подходящи условия, а възможността да се достигне милиметрова точност позволява данните от TLS технологията да се използват и за ранно известяване при следенене на деформационни процеси.

REFERENCES

1. Маждраков, М., Иванова, Ил., Геодезия, учебник, ШУ “Епископ Константин Преславски”, Шумен, 2014.
2. Щерева, К. Мониторинг при експлоатация на открити рудници чрез наземно лазерно сканиране, Дисертация, МГУ, София, 2018.
3. Bitelli, G., Dubbini, M., Zanutta, A. Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry Techniques to Monitor Landslide Bodies, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 35, 2004.
4. Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A. Use of LIDAR in landslide investigations: A review. Nat. Hazards, 2012.
5. Lemmens, M. Geo-information Technologies, Applications and the Environment, Springer, 2011.
6. Schneider, D. Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams, 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, 2006.
7. Soudarissanane, S.S. The Geometry of Terrestrial Laser Scanning, Technische Universiteit Delft, 2016.
8. Wang, G., Philips, D., Joyce, J., Rivera, F.O. The Integration of TLS and Continuous GPS to Study Landslide Deformation: A Case Study in Puerto Rico, Journal of Geodetic Science, 2011.
9. Xiong, L., Wang, G., Bao, Y., Zhou, X., Wang, K., Liu, H., Sun, X., Zhao, R. A Rapid Terrestrial Laser Scanning Method for Coastal Erosion Studies: A Case Study at Freeport, Texas, USA, Sensors (Basel), 19(15), 2019.