

Fotointerpretáció és távérzékelés 3.

A lézer alapú távérzékelés

Verőné Wojtaszek, Malgorzata

Fotointerpretáció és távérzékelés 3.: A lézer alapú távérzékelés

Veróné Wojtaszek, Malgorzata

Lektor: Büttner, György

Ez a modul a TÁMOP - 4.1.2-08/1/A-2009-0027 „Tananyagfejlesztéssel a GEO-ért” projekt keretében készült. A projektet az Európai Unió és a Magyar Állam 44 706 488 Ft összegben támogatta.

v 1.0

Publication date 2010

Szerzői jog © 2010 Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar

Kivonat

A modul bemutatja a lézeres adatnyerési technológiát, kifejlesztésének előzményeit, a lézersugárzást, mint egy különleges elektromágneses energiaforrást és bevezet a lézerhullámokkal megvalósítható adatnyerésbe. Elméleti és gyakorlati ismereteket nyújt a LIDAR (Light Detection and Ranging) távérzékelési rendszerek témakörében. Foglalkozunk továbbá a lézeres technológiával nyert adatok feldolgozásának egyes kérdéseivel. Külön alfejezetben foglaljuk össze a LIDAR alkalmazási lehetőségeit.

Jelen szellemi terméket a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény védi. Egészének vagy részeinek másolása, felhasználás kizárólag a szerző írásos engedélyével lehetséges.

Tartalom

3. A lézer alapú távérzékelés	1
1. 3.1 Bevezetés	1
2. 3.2 A lézer működésének alapjai	1
3. 3.3 LIDAR alapjai	3
3.1. 3.3.1 Működési elvek	3
3.2. 3.3.2 A lézeres rendszerek típusai	5
3.2.1. 3.3.2.1 Topográfiai LIDAR	5
3.2.2. 3.3.2.2 Mélységmérő LIDAR	9
3.2.3. 3.3.2.3 Több visszaverődést regisztráló LIDAR	9
3.2.4. 3.3.2.4 Teljes jelalakos lézerszkennelés	10
4. 3.4 A LIDAR rendszerek működési elve	11
5. 3.5 LIDAR szenzorok és technikai paraméterei	13
6. 3.6 A LIDAR mérések feldolgozása	15
7. 3.7 A LIDAR alkalmazási lehetőségei	17
7.1. 3.7.1 Digitális felszínmodellek előállítása	18
7.2. 3.7.2 Partvonalak felmérése	19
7.3. 3.7.3 A vízmélység mérés	19
7.4. 3.7.4 Városi modellezés	20
7.5. 3.7.5 A LIDAR erdészeti alkalmazásai	20
7.6. 3.7.6 Egyéb alkalmazási területek	22
8. 3.8 Összefoglalás	22

A táblázatok listája

3-1. Néhány LIDAR rendszer fontosabb paraméterei. Forrás:

<http://www.optech.ca/altmhow.htm>, <http://www.toposys.com/>, http://www.xyz.au.com/members/intelligence/pdf_files/LIDAR.pdf 14

3-2. táblázat FALCON III (TopoSys) rendszerbe beépített képkészítő felvevő paraméterei. Forrás:

<http://www.toposys.com/>. FALCON III (TopoSys) rendszerbe beépített képkészítő felvevő paraméterei.
Forrás: <http://www.toposys.com/> 15

3. fejezet - A lézer alapú távérzékelés

1. 3.1 Bevezetés

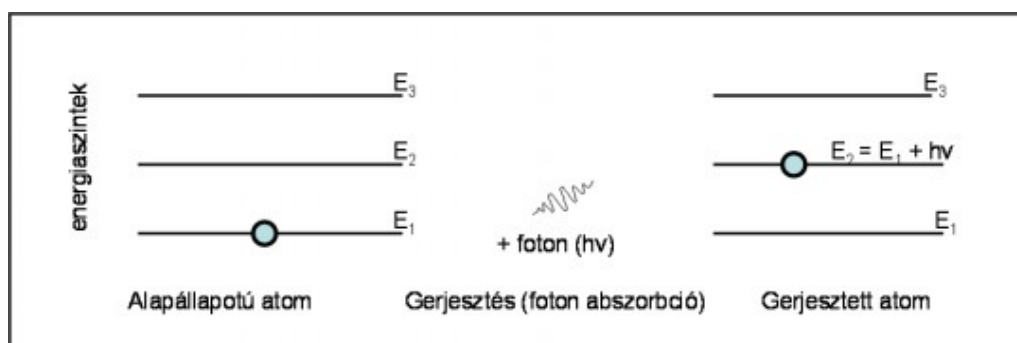
A modul bemutatja a lézeres adatnyerési technológiát, kifejlesztésének előzményeit, a **lézersugárzást**, mint egy különleges elektromágneses energiaforrást és bevezet a lézerhullámokkal megvalósítható adatnyerésbe. Elméleti és gyakorlati ismereteket nyújt a LIDAR (Light Detection and Ranging) távérzékelési rendszerek témakörében. Foglalkozunk továbbá a lézeres technológiával nyert adatok feldolgozásának egyes kérdéseivel. Külön alfejezetben foglaljuk össze a LIDAR alkalmazási lehetőségeit.

2. 3.2 A lézer működésének alapjai

A lézeres felmérési technológiában hosszú évek óta folynak kutatások. A kezdetnek a XX század harmincas éveiben végzett felmérések tekinthetők, amikor egy erős reflektor által kibocsátott fényimpulzus szóródását figyelték meg az atmoszférában. Jó időjárás esetén a fény 30 km-es távolságra is eljutott. A lidar technológia gyors fejlődése azonban a lézer kifejlesztése után indult meg (az első lézert az amerikai Theodore H. Maiman fejlesztette ki 1960-ban), amikor a hagyományos fényforrást lézer váltotta fel. Sikerült regisztrálni a lézer impulzus visszaverődését a Hold felszínéről. A lézeres vizsgálatokat kiterjesztették később az atmoszférára, a vízmélység mérésre és a földfelszín kutatására.

A lézer szó az angol **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** (LASER) - fényerősítés kényszerített fénykibocsátás útján – kifejezéséből származik. A **lézer** egy olyan különleges elektromágneses energiaforrás, amely stimulált emissziót használ egybefüggő fénysugár létrehozására. A lézer működésének megértéséhez az atomfizika törvényei adnak segítséget. Elsősorban az a rész, amely áttekintést nyújt az atomok energiaszintjeiről és magyarázatot ad arra, hogy az ezekben az energiaszintekben bekövetkező változások hogyan vezetnek a lézerfény létrehozásához.

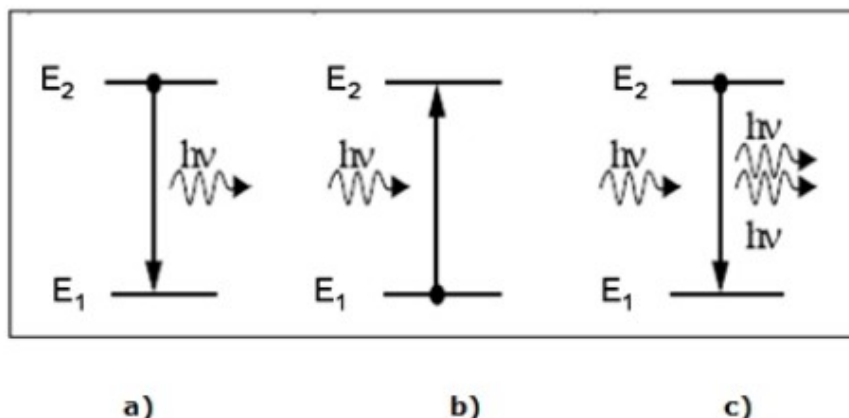
Az atommag és az elektronok közti kapcsolat energiaszintekkel jellemezhető. Az elektronok rendes körülmények között a lehető legalacsonyabb energiaszinteket foglalják el. Ebben az esetben az atom alapállapotáról beszélünk (3-1. ábra). Az elektronok azonban magasabb energiaszinteket is elfoglalhatnak, szabadon hagyva az alacsonyabb szintet. Az elektronok az energia elnyelésével (abszorpció) vagy kibocsátásával (emisszió) az egyik energiaszintről a másikra válhatnak. Az atom energiaszintje változásának e két jól ismert módját nevezzük radiatív átmenetnek. A radiatív átmenetek harmadik fajtája ún. stimulált emisszió a lézer működésének alapját jelenti.



3-1. ábra Alapállapotú és gerjesztett atom energiaszint változása: $E_1, 2, 3$ – energiaszintek, foton ($h\nu$). Forrás: http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2005_cikkek/nanai_laszlo.pdf

Abszorpció Az elektron különböző külső forrásokból nyelhet el energiát. Egy foton teljes energiájának átvitele egy keringő elektronba az elektron energiájának megnövekedését eredményezi és magasabb energiaszintre való „ugrásra” készíti. Ebben az esetben az atom „gerjesztett” állapotba kerül (3-1. ábra, 3-2b. ábra). Az energiaszintek diszkrétnek tekinthetők, így az elektron csak pontos energiameennyiség hatására fog átugrani egy megengedett energiaszintről egy másikra, ezért csak az elektron számára elfogadható energiájú vagy hullámhosszú fotonok nyelődnek el. Hasonló eredmény érhető el egyfajta elektromos kisülés során. Ebben az eljárásban az energiát elektromos mező által gyorsított elektronok ütköztetésével biztosítják.

Mindkét típusú gerjesztés lényege az, hogy az energia elnyeléséből következően egy elektron magasabb energiaszintre kerül, mint amilyeneken addig volt, és az atomot, amelynek az adott elektron a része, gerjesztettnek nevezzük.



3-2. ábra Egy atom két energiaszintjei között lezajló jelenségek: a) spontán emisszió, b) abszorpció c) stimulált emisszió, $E_{1,2}$ – energiaszintek, foton ($h\nu$). Forrás: Kecik J., 2006). Forrás: http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2005_cikkek/nanai_laszlo.pdf

Spontán emisszió

Az atomi szerkezet egésze a lehető legkisebb energiájú állapotra törekszik. Egy gerjesztett elektron alacsonyabb energiaszintre kerülhet vissza például az energia bizonyos részének hővé alakításával vagy a foton spontán emissziója útján. A foton — amit a gerjesztett állapotát megszüntető atom kibocsát — energiája pontosan egyenlő lesz a gerjesztett és az alacsonyabb energiájú állapotok közötti energiakülönbséggel.

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

h – Planck állandó ($6,62 \cdot 10^{-34}$ Js), ν – frekvencia

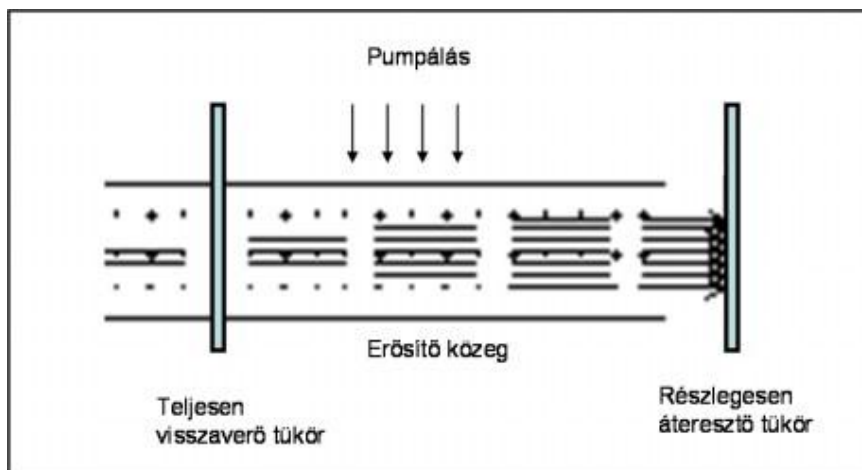
A fotonnak ezt a felszabadulását nevezzük spontán emisszióknak.

Stimulált emisszió

Feltételezzük, hogy valamely átlátszó anyagi közegben vannak olyan atomok vagy molekulák, amelyeknek eltérő az energiaszintje (E_2, E_1). Einstein feltevése szerint (1917), ha a gerjesztett állapotban levő atomhoz egy olyan foton érkezik, amelynek frekvenciája megfelel a gerjesztett és az alacsonyabb energiaszintű atom energiakülönbségének, (azaz a $h\nu = E_2 - E_1$ frekvenciafeltétel teljesül) akkor bekövetkezhet az indukált fotonemisszió. Ennek során az atom visszatér az alacsonyabb energiaszintű állapotába, s a gerjesztett állapot többletenergiját egy kibocsátott foton viszi el. A folyamat eredményeként tehát két foton hagyja el a közeget, az eredeti beérkező foton, s az emittált újabb foton. A másik atom által **kibocsátott foton a frekvenciát, energiát, irányát és fázisát tekintve azonos lesz a hatást kiváltó fotonéval**. A két foton útját folytatva további atomokat stimulál emisszióra.

Ugyanezt a fotonon azonban a kisebb energiájú állapotban lévő atom vagy molekula el is nyelheti. A lézer működéséhez ezért arra van szükség, hogy a fénykibocsátó nagyobb energiájú állapot betöltöttsége nagyobb legyen, mint a fényelnyelő kisebb energiájú állapoté. A magasabb energiaszintű állapotok véletlenszerűen, spontán is bocsátanak ki fotonokat. Ezek a fotonok további fotonok kisugárzását indukálják és egyre több energia koncentrálódik koherens fotonok formájában. Azt a hullámhossztartományt, amelyben a fénykibocsátás mértéke nagyobb, mint a fényelnyelésé, a lézer **erősítési sávjának** nevezzük (femto.chem.elte.hu/kinetika/Laser/Laser.htm).

Ha egy megfelelő közeg kellően sok gerjesztett atomot tartalmaz, és a visszaállás csak spontán emisszióval történik, a kibocsátott fény véletlenszerű és körülbelül egyenlő lesz minden irányban. A stimulált emisszió folyamata azonban megnövelheti egy bizonyos irányban haladó fotonok számát (3-3. ábra).



3-3. ábra Stimulált foton emisszió folyamata

Egy irányba előnyben részesíthetünk tükrök használatával. Azok a fotonok, amelyek nem merőlegesek a tükrökre, kiszöknek a rezonátorüregből. A két tükör tengelye mentén oda-vissza verődő fotonok minden egyes áthaladás során további fotonok kisugárzását indukálják (3-3. ábra). Ha gondoskodunk a folyamatos pumpálásról (a magasabb energiaszint betöltöttsége), akkor egyre több energia koncentrálódik a rezonátorüregben, koherens fotonok formájában. Ez az energiaforrás úgy „csapolható meg”, ha a rezonátorüreg egyik végén lévő tükör részben áteresztő, így a keletkező fotonok adott hányada folyamatosan kiléphet a rezonátorüregből. Ezt a kilépő párhuzamos, monokromatikus és koherens sugárzást nevezzük **lézersugárzásnak**.

Az indukált emisszió eredménye egy tökéletesen rendezett nyaláb, amelyet koherens nyalábnak is szoktak nevezni. A koherens nyaláb széttartása rendkívül kicsi - például egy megfelelő optikával a Földtől 380 ezer km-re lévő Holdra juttatott lézernyaláb átmérője mindössze 50 m lesz. A koherens nyaláb másik kedvező tulajdonsága, hogy a lézer energiája egy megfelelő optikával nagyon kis foltra (kb. egy tízmilliomod mm^2 -re) fókuszálható.

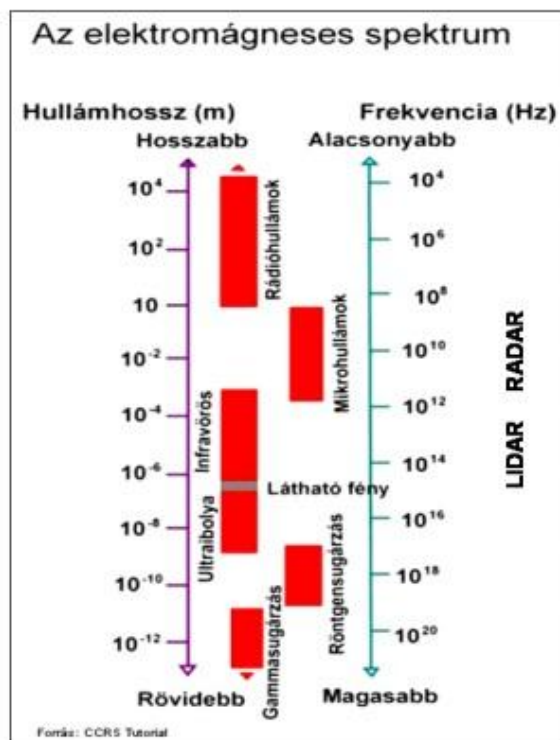
A lézersugárzás tulajdonságai

- A létrejött fény **időben és térben koherens**, a lézer által kibocsátott hullámok fázisa a sugár minden keresztmetszeténél azonos.
- A lézernyaláb keskeny és **nagyon kis széttartású nyaláb** (a lézerfény nagyrészt párhuzamos fénysugarakból áll). Ezzel nagy energiasűrűség érhető el szűk sugárban, a sugár által megtett távolságtól függetlenül.
- A lézerek **energiája kis térrészben koncentrálódik**, a lézerfény teljesítménysűrűsége a megszokott fényforrásokénak sokszorosa lehet.
- A lézer által kibocsátott hullámok mágneses mezejének iránya állandó (**polarizáció**).
- A lézersugár egy olyan elektromágneses hullám, amely közel egyetlen hullámhosszú összetevőből áll (a lézerek fénye **egyszínű, monokrom**).

3. 3.3 LIDAR alapjai

3.1. 3.3.1 Működési elvek

A LIDAR (Light Detection and Ranging) aktív távérzékelési rendszerekhez tartozik, ami azt jelenti, hogy a felvevő berendezés saját energiaforrással rendelkezik – így sugárforrás és érzékelő egyaránt. A működési elve legjobban a radar működési elvével hasonlítható össze, azzal az alapvető különbséggel, hogy a LIDAR által kibocsátott és fogadott elektromágneses sugárzásnak magasabb a frekvenciája (3-4. ábra).



3-4. ábra Az elektromágneses spektrum tartományai és frekvenciájuk Forrás: www.fomi.hu/.../elektromagnesesspektrum.htm, CCRS Tutorial

A LIDAR az ultraviola, a látható és az infravörös tartományban működik. A LIDAR működésének alapelve megegyezik az elektromágneses energia alapú (Electronic Distance Measuring Instrument) távolságmérés elvével. A lézer által kibocsátott energia-impulzus (vagy folytonos hullám) kölcsönhatásba kerül a terjedés irányában lévő objektumokkal, melynek következményeként visszaverődik. Az egyes impulzusok kibocsátása és visszaverődése között eltelt idő rögzítésre kerül. Mivel az elektromágneses energiaterjedési sebessége ismert, a tereptárgynak a lézertől való távolsága meghatározható a tárgy által visszavert sugár kibocsátásának és visszaérkezés idejének különbségéből (3-5. ábra). A terepi tárgyak (mérési pontok) pontos térbeli elhelyezkedésének (koordinátáinak) meghatározásához azonban szükséges a szenzor helyének és helyzetének pontos ismerete.



3-5. ábra A lézeres rendszerek működésének alapelve. Forrás:
http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm

3.2. 3.3.2 A lézeres rendszerek típusai

A 90-es évekig a lézeres felmérések széleskörű gyakorlati alkalmazásának nemcsak a műszerek és a felvételezés viszonylag magas költségei szabtak gátat, hanem inkább az a tény, hogy a légifelmérések esetén a hordozóeszköz helyzetének precíz meghatározása nem volt lehetséges. A légi felmérésekhez nélkülözhetetlen navigációs rendszerek technikai fejlődése, a GPS mérések pontosságának nagyméretű javulása – a 90-es évektől kezdve - lehetővé teszi a pontos lézeres felméréseket, valamint georeferált téradatak nyerését. A jelenleg elterjedőben lévő légi lézerszkennelés teljesen új lehetőségeket ad az adatnyerés sebessége, mennyisége és a kinyerhető információ mennyisége, valamint pontossága szempontjából. A nagymennyiségű és pontos adatok alkalmazási területei növekednek és új felhasználási területek is megjelennek, mint például: távvezetékek térképezése, lakóterületek modellezése távközlési antennák telepítése céljából, zajmodellezés, katasztrófák utáni kárbecslés, stb. Napjainkban a gazdaság egyre több területen igényli a napi gyakorlati munkához a Föld felszínének, domborzati viszonyainak pontos, megbízható és naprakész jellemzését. A felszínt leíró adatok több forrásból, különböző technológiák alkalmazásával nyerhetők:

- földi felmérésekből,
- meglévő térképi alapok feldolgozásával, szintvonalrajzának digitalizálásával, vagy domborzati fóliájának szkennelésével,
- távérzékelési módszerekkel.

A kialakulás óta gyors ütemben fejlődő távérzékelésnek egyre fontosabb szerepe van a földfelszín térképezésében. A mérőkamerás légifényképek és nagyfelbontású úrfelvételek mellett az aktív távérzékelési technológiák alkalmazásával is nyerhetők felszíni adatok. Az utóbbi területen a lézeres mérések – az eddigi kutatási eredmények alapján – különösen jól alkalmazhatók a földfelszínre (borított területeken is) vonatkozó információk nyeréséhez. A lézeres (LIDAR) térképezési technológiával nyert adatok (mérési pontok) térbeli eloszlása közel homogén, sűrűsége rendkívül nagy. Egy pontnak a koordinátái egy mérésből meghatározhatók, ellentétben a fotogrammetriával, ahol átfedések fényképek szükségesek ennek méréséhez. A lézeres felmérések pontossága vízszintes értelemben 15 cm, horizontálisan pedig 25 cm. Ennek a felmérési pontosságnak a teljesítése a navigációs rendszer (GPS) és az inerciális navigációs rendszer (INS) együttes alkalmazásával lehetséges.

A lézeres energiaforrás és az azon alapuló szkennelési technológia kifejlesztését követően olyan adatnyerési műszaki megoldások születtek, amelyek képesek különböző adatigényeket kielégíteni. Ez azért szükséges, mert különböző szakterületek a földfelszínre vonatkozó adatokból csak azokat emelik ki és használják fel, amely számukra fontosok, esetleg új információt jelentenek. A többi adat kiszűrésre kerül. A jelenleg kifejlesztett és alkalmazott rendszerek vagy a speciális szakterületek részére biztosítanak adatokat (pl. mélységmérő LIDAR), vagy a kifejlesztésnek az volt a célja, hogy minél több felhasználó által megfogalmazott az adatokkal szembeni mennyiségi és minőségi követelményeket kielégítsék.

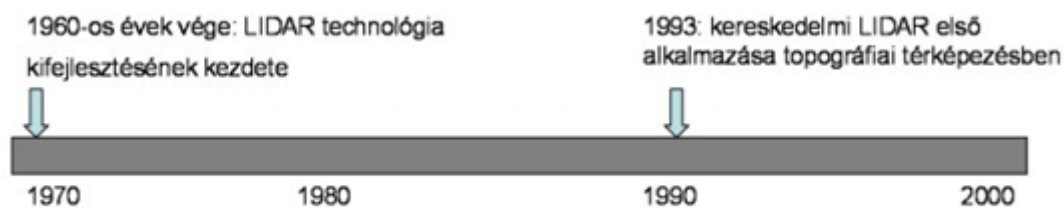
A következőkben a lézeres rendszerek négy típusát kerül ismertetjük (http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm):

- Topográfiai LIDAR
- Mélységmérő LIDAR
- Több visszaverődést regisztráló LIDAR
- Teljes jelalakos lézerszkennelés (Forrás: http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm)

3.2.1. 3.3.2.1 Topográfiai LIDAR

A navigációs rendszerek megjelenése és technikai fejlődése lehetővé tette a pontos légi lézeres felméréseket és így georeferált téradatak nyerését. A 90-es évek végétől kezdték el alkalmazni a komplex LIDAR topográfiai

térképező rendszereket (3-6. ábra). Ezek különösen jól felhasználhatók építkezések tervezéséhez, árvízvédelmi elemzések készítéséhez, rádióhullám terjedés (GSM-rendszerek) modellezéséhez.



3-6. ábra A lézeres rendszerek kezdete

A légi lézerszkennerek rendszer felépítése

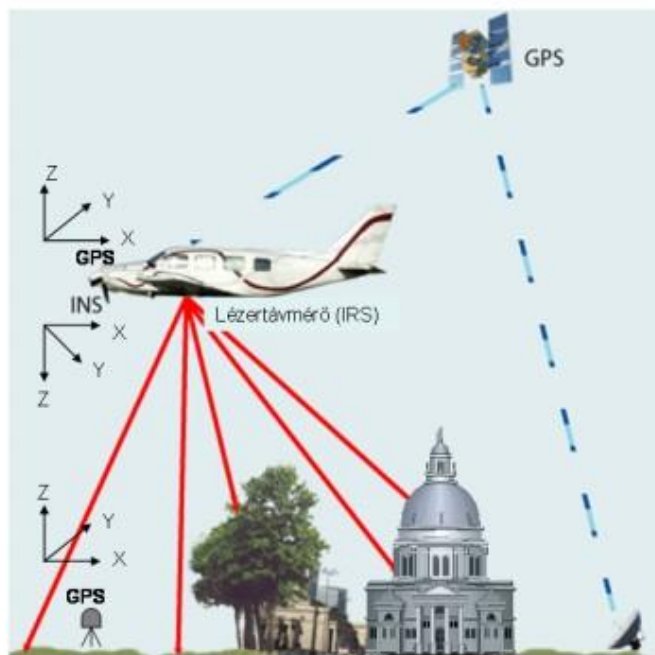
A légi lézerszkennerek rendszer két – fedélzeti (repülő) és földfelszíni - egységből áll (3-7. ábra). A fedélzeti egység a következő elemekből épül fel (<http://www.atomnet.pl/~geodeta/1999/45text.htm>):

- lézertáv mérő (LRF – Laser Range Finder),
- navigációs rendszer GPS (Global Positioning System),
- inerciális navigációs rendszer INS (Inertial Navigation System),
- videokamera (lehet),
- az adatrögzítő egység,
- a repülést tervező és végrehajtó egység.

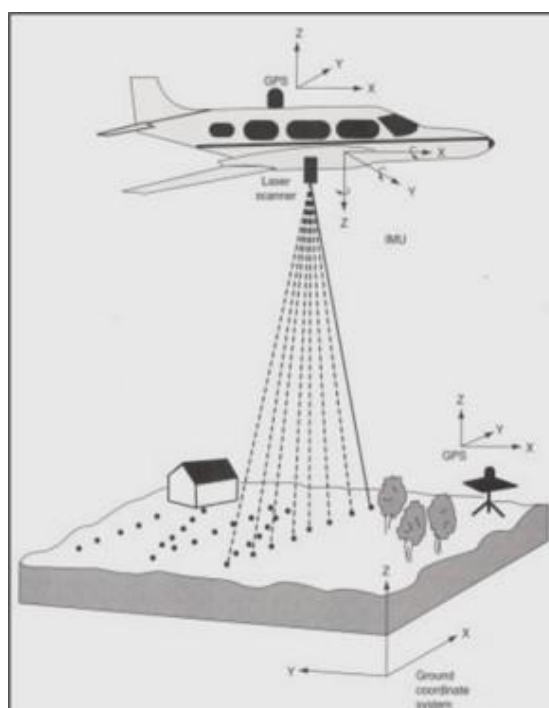
A földfelszíni egység elemei a következők:

- felszíni GPS állomás (referencia mérések),
- munkaállomás (az adatokat feldolgozó egység).

A **lézeres távmérő** az elektromágneses spektrum tartomány a látható és az infravörös (1540 nm-ig) szakaszában működik. Az energia-impulzusokat gerjesztő távmérő rendszerek mérési gyakorisága 300-15.000 Hz között lehetséges. Ez azt jelenti, hogy a műszer másodpercenként több ezer pont távolságát mérheti. A kibocsátott lézersugarat a lézerszkennerek (3-8. ábra) a terep felé irányítja.



3-7. ábra A légi lézerszkennér rendszer komponensei. Forrás: <http://www.atomnet.pl/~geodeta/1999/45text.htm>



3-8. ábra Légi lézeres szkennelés vázlatja. Forrás: https://www.e-education.psu.edu/geog883/15_p8.html

A lézernyaláb a repülés irányára merőlegesen pásztázza a vizsgált területet, miközben a repülőgép meghatározott sebességgel előre halad. A rendszer hatótávolsága alapvetően függ a lézersugár kibocsátási energiájától, a távolságtól, a sugár széttartásától és felszín visszaverődési tulajdonságaitól. A hatótávolságot továbbá a légköri hatások és a vevő érzékenysége is befolyásolják. A lézer impulzus a felszínen szóródik és csak egy része érkezik a repülő felé, ami rögzítésre kerül. A tereptől függően a lézersugár magassági törést szenvedhet (kölsönhatásba kerül a terepről kiemelkedő objektummal pl. épület széle), ilyenkor a sugárnyaláb egy része visszaverődik, a maradék továbbmegy a felszín felé és onnan verődik vissza. Az először érkező visszaverődést első visszaverődésnek (first echo) a későbbit pedig utolsó visszaverődésnek (last echo) nevezzük. Egyes szenzorok egy lézersugár több különböző magasságról történő visszaverődését is képesek érzékelni és rögzíteni.

A lézeres **felmérések terepi felbontása** (pontok távolsága) a haladási sebességtől, aszkennelési frekvenciától és a pásztázott terület szélességétől függ (Barsi Á.-et all, 2003):

- Pontok távolsága a repülés irányában

$$(v/sf)/2$$

v: szenzor sebessége, sf: szkennelési frekvencia

- Pontok távolsága keresztirányban

$$(2 \cdot sf \cdot sw) / rf$$

$$sw = 2 \cdot sh \cdot \tan(sa / 2)$$

sw: szkennelési sáv szélessége, sh: szenzor magassága, sa: szkennelési szög

rf: kibocsátási frekvencia (pulzus gyakorisága)

Táv mérés pontossága

$$D = c \cdot t / 2$$

D-távolság, c-fény sebessége, t-fény utazási ideje (oda-vissza)

Felbontás

$$\Delta D = v \cdot \Delta t / 2$$

A lézeres felmérések pontossága a rendszer összetevőinek működési pontosságával függ össze. Ennek meghatározásánál különösen a következő három tényezőt kell figyelembe venni:

1. A szenzor távmérési pontossága
2. A navigációs (GPS/INS) rendszer helymeghatározási pontossága
3. A szenzor és a navigációs rendszer kalibrációja

A navigációs (GPS/INS) rendszer helymeghatározási pontossága, valamint a szenzor és a navigációs rendszer kalibrációja

A távmérővel együtt működik a GPS rendszer, amely meghatározza a hordozó jármű (repülőgép) pozícióját, ahonnan a lézernyaláb kibocsátásra került és az INS rendszer, amely méri a fedélzet (amelybe beépítették a lézerszkennert) aktuális dőlésszögét. A három forrásból származó adatok integrációja megadja a helyzetet, ahonnan a mérés megtörtént, a mért távolságot és a távolság térbeli irányát, ami lehetőséget ad egy adott pont x,y,z koordinátáinak meghatározására.

A GPS és az INS rendszerek integrálása lehetővé teszi nagy pontosságú és stabilitású adatok nyeresét. A másodpercenként vett GPS jelekből interpolált pozíció adatok csak igen durván közelítik a nagy sebességgel mozgó hordozó eszköz aktuális pozícióját, így az 1Hz-nél nagyobb mérési gyakoriságú rendszerek (pl. a lidar rendszerek mérési gyakorisága 300-15.000 Hz) alkalmazása integrált pozíció meghatározási eljárást igényel. További gondokat okoz a GPS jeleket terhelő szabályos és véletlen hibák jelenléte.

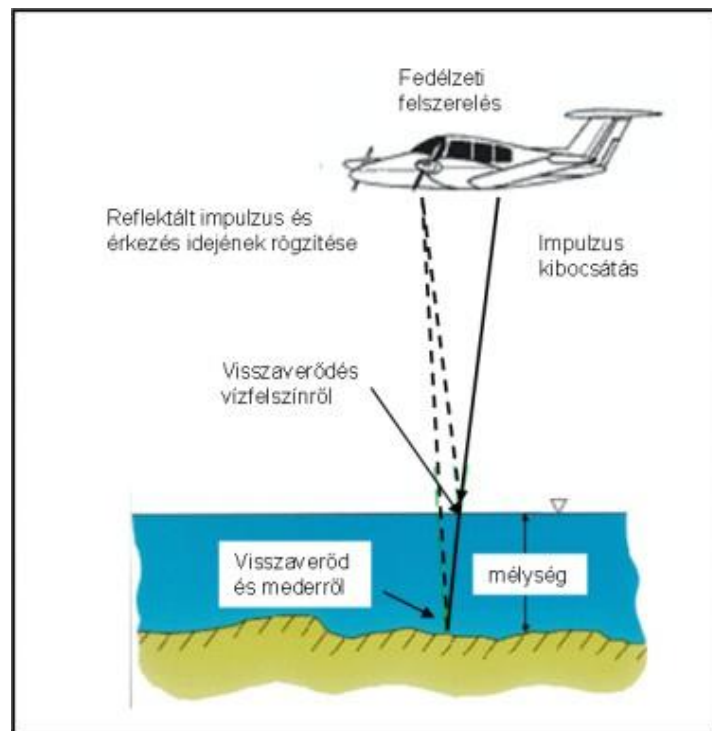
A GPS vevő INS-el történő integrációja lehetőséget nyújt az említett problémák kiküszöbölésére. Az integrált megoldásnál a rövid időtávon nagy pontosságú, stabilitású és nagy pozicionálási gyakoriságú INS rendszer biztosítja a GPS jel hibáinak, jelkimaradásainak áthidalását, szűrését. Mivel az INS rendszer hosszú távú megbízhatósága a giroszkóp és a gyorsulásmérő mérési hibáinak halmozódása miatt az idővel rohamosan romlik, időnként szükséges az INS rendszer jeleinek kalibrálása a GPS által szolgáltatott hosszú távú stabilitást

biztosító mérési adatokkal. Az INS hibahalmozódás elkerülhető az INS folyamatos kalibrálásával GPS pozíció adatok felhasználásával. Az effektív pozicionálási hibát így alapvetően a GPS méréseket terhelő szabályos és véletlen hibák mértéke határozza meg. Az integrált INS GPS rendszer lehetővé teszi a folyamatos nagy pontosságú pozíció mérését.

A felszíni pontok helymeghatározási pontosságát alapvetően a navigációs (GPS/INS) rendszer pontossága határozza meg (Barsi Á., 2003). A lézeres távmérő a helyzeti hibához csak kis mértékben járul hozzá.

3.2.2. 3.3.2.2 Mélységmérő LIDAR

A lézer technológiának egyik speciális felhasználási területe a vízmélység mérés. A vízmélység mérése során a kibocsátott energia eléri a vízfelszínt, ahol a Fresnel reflektancia következtében az energia egy része szóródik és visszaérkezik a felvevőhöz, miközben a maradék energia folytatja az útját a vízen át a mederig (3-9. ábra). A sugárnyaláb a meder felszínrel kölcsönhatásba lép és ezt követően visszaverődik a vevőhöz. A lézerimpulzusból eredő vízfelszín és egy mélységi pont (meder) által visszavert energia érkezési időkülönbsége lehetőséget ad a vízmélység meghatározására.



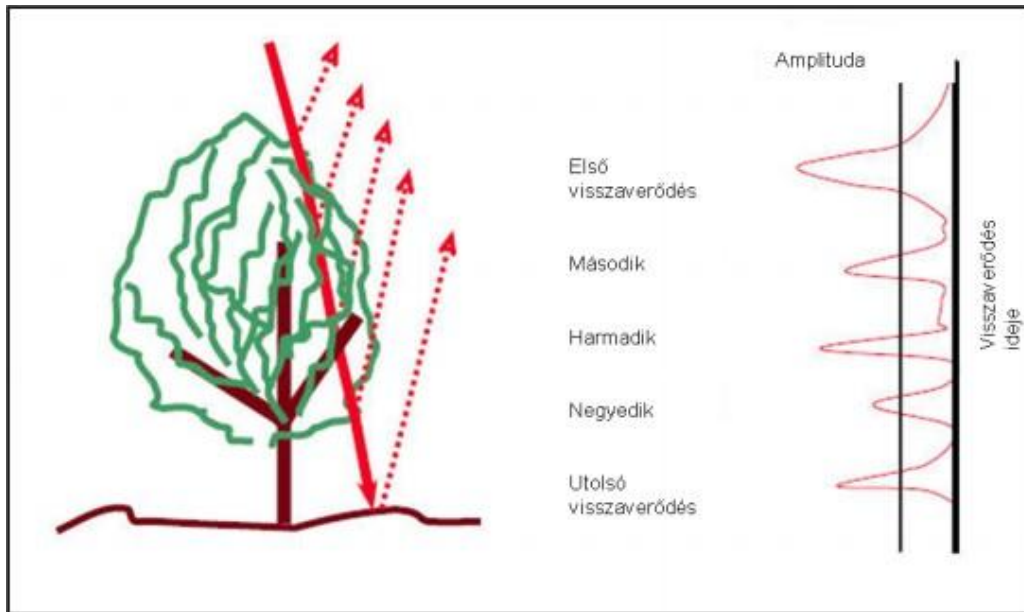
3-9. ábra Mélységmérő LIDAR mérési folyamatának sémája

A mélységmérő LIDAR-ok a látható spektrumtartomány kék és zöld sávjában működnek. Ennél hosszabb hullámú energia nem alkalmas ilyen jellegű mérésekre a víz okozta energia abszorpció miatt. A lézereenergia terjedése vízben alapvetően a víz tisztaságától függ és kedvező körülmények között 40 (70) m-es mélységbe is eljut. A mérések pontossága horizontális irányban 15 cm, vertikális irányban pedig 25 cm. A maximális mélység, mely az adott lézeres felvevővel mérhető a víz tisztaságától és a meder visszaverésétől függ. Az energia terjedését azonban a legnagyobb mértékben a víz zavarossága befolyásolja. A detektált jelek a továbbiakban csak akkor használhatók fel a mélység mérésére, ha a mederről és a vízfelszínről érkező jelek egyértelműen megkülönböztethetők.

A földfelszín kutatásához kifejlesztették az ún. hibrid LIDAR rendszereket, melyek mind a közeli infravörös, mind a látható spektrum zöld szakaszában is működnek. Ebben az esetben a NIR energia felhasználható a föld- és vízfelszín reflektanciájának méréséhez. Az energia zöld tartománya pedig kifejezetten a vízmélység (meder topográfia) mérését teszi lehetővé. A hibrid rendszerek alkalmazásával egyidejűleg mérhető a földfelszín és a víztestek medrének topográfiája.

3.2.3. 3.3.2.3 Több visszaverődést regisztráló LIDAR

Egy kibocsátott lézer impulzus visszaverődése többszörös is lehet. Abban az esetben, ha az impulzus terjedése során különböző magasságú objektumokkal lép kölcsönhatásba, az energiának egy része a legközelebbi objektumról verődik vissza. Az energia fennmaradó része tovább halad és a távolabbi tárgyról verődik vissza. Ennek tipikus példája az erdős területek felmérése (3-10. ábra).



3-10. ábra Egy impulzus többszöri (többrészletű) visszaverődése egy fa példáján Forrás: http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm

Erdős területen az impulzus egy része a fa koronáról verődik vissza, míg egy része eljut a földfelszínig és innen verődik vissza. Természetesen felléphet köztes visszaverődés is, amikor az energia útjában pl. bokrok találhatók. A köztes visszaverődés csak akkor kerül rögzítésre, ha annak intenzitása eléri egy bizonyos küszöbértéket. A küszöbérték ezáltal úgy működik, mint egy zajszűrő. A küszöbértéknél nagyobb, reflektált energia mintavételezése különböző módon történhet:

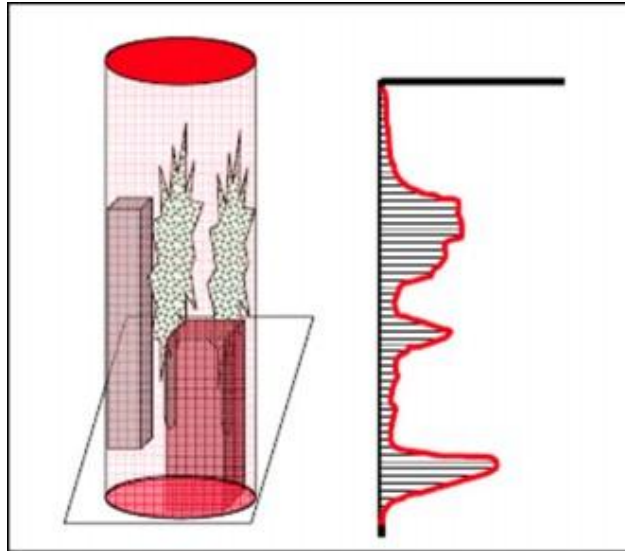
- Legjelentősebb (legszenifikánsabb) jel mintavételezése
- Az első és az utolsó jelentős jel mintavételezése
- Az összes - küszöbértéknél nagyobb – jel rögzítése. A jelenleg működő rendszerek az egy impulzusból származó 5-8 köztes visszaverődést képesek regisztrálni.

A 3-10. ábrán láthatjuk, hogy az első visszaverődés a legjelentősebb és a fakorona tetejéről érkezik. A legszenifikánsabb jel mintavételezése esetében ennek a pontnak a koordinátái kerülnek regisztrálásra. Az első és az utolsó visszaverődés rögzítése esetén a fa magassága a visszaverődések időkülönbségéből meghatározható.

A korszerű LIDAR rendszerek képesek több visszaverődést regisztrálni. Ez a tulajdonság különösen kedvező a városi és ipari területek felmérésében, valamint a földfelszín borítás modellezésében. További előnye, hogy megfelelő technológia felhasználásával alkalmas a felmért területek háromdimenziós megjelenítésére, egyidejűleg rögzítve a felszín, a fák és egyéb objektumok (épületek, távvezeték) magasságát.

3.2.4. 3.3.2.4 Teljes jelalakos lézerszkennelés

A tipikus ALS (Airbone Laser Scanning) rendszerek a visszaverődő lézernyaláb első és utolsó jelét tudják rögzíteni, ami sok alkalmazás szempontjából nem elegendő, különösen sűrű felszínborítások esetén, mint pl. erdők vagy beépített területek (Székely B. et al).



3-11. ábra Teljes jelalakos lézerszkennelés. Forrás:

http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm

Az adathordozók és a rögzítési technológia fejlődésének eredményeként jelenleg lehetséges már a visszavert lézerpulzus teljes jelalakjának a rögzítése, ami lehetővé teszi nagysűrűségű adatok felvételezését. A rögzítésre kerülő pontok térhez vannak kötve, és szinte folytonosan mintavételezik a földfelszínt (3-11. ábra). Az ilyen módon nyert adatok feldolgozása során a zavaró zajok szűrhetők és szelektálhatók. A felszín elemeiből különböző szakterületek számára értékes adatok nyerhetők. Például ha az antennát telepítő kommunikációs szakemberek a jelterjedési viszonyok iránt érdeklődnek, így számukra az akadályt jelentő természetes vagy mesterséges objektumok pontos felmérése a cél. A teljes jelalakos lézerszkennelés adatait alapvetően a digitális domborzat modell (DDM) és digitális felszínborítás modell (DTM) előállításához használják. Az első esetben a földfelszínről „kiemelkedő” jeleket el kell távolítani. Ez főleg beépített és erdővel borított területeket érint, hiszen itt a kibocsátott impulzusból származó visszaverődések többségét a fakorona vagy épület eredményezi, ami nem tartalmaz információt a felszínre vonatkozóan. A feldolgozás során ezek a pontok eltávolításra kerülnek. Az impulzus egy része a felszín borításán átjutva a felszínre vonatkozó információt hordoz. Ezek a jelek erősítésre kerülnek. A tapasztalatok azt mutatják, hogy téli időszakban a lézer energiának 35 %-a átjut a túlevélű lombzaton és 60 %-a átjut a lomblevelű borításon, majd az energia eljut a földfelszínig, és onnan visszaverődik. Nyári időszakban (vegetációs időszak) ez az érték 25-40 %-ra és 20-25 %-ra változik. Ez a visszaverődés elegendő nagy pontosságú DDM előállításához erdős területeken.

4. 3.4 A LIDAR rendszerek működési elve

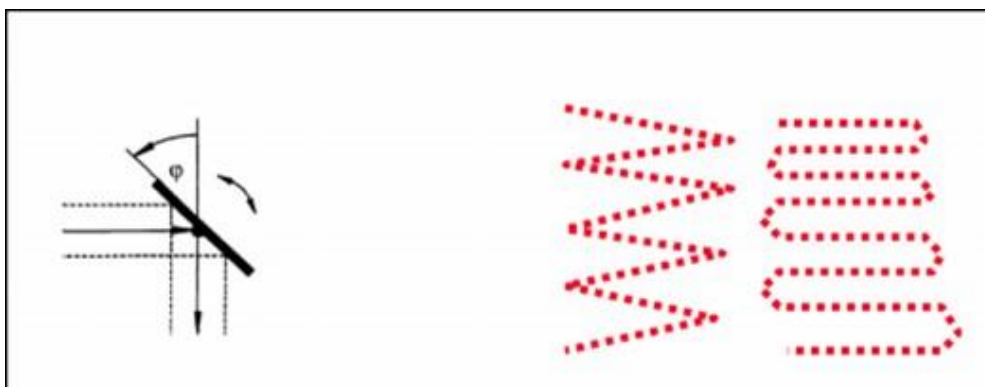
A különböző technikák alkalmazásának eredményeként eltérő tulajdonságú adatok rögzíthetők, ami figyelembe vehető az adatnyerési igények kielégítésénél, az adatok felhasználásánál. A jelenleg elterjedt lézerszkennerek típusok által rögzített adatok eltérnek a gyakoriságban (mérési pontok sűrűségében), a térbeli eloszlásban, a mért pontok intenzitásában, stb. A leggyakrabban használt szenzorok: ALTM (Optech Canada), ALS (Leica Geosystems), Toposys (Toposys GmbH), TopEye (Hansa Luftbild) és RIEGL (RIEGL LMS).

A lézer letapogatás megvalósításához kifejlesztett technikai megoldások között legjobban a következő négy terjedt el (Barsi A. et al, 2003):

- Oszcilláló tükrös
- Forgó-poligon szkennerek
- Nutáló tükrös szkennerek
- Optikai szálak

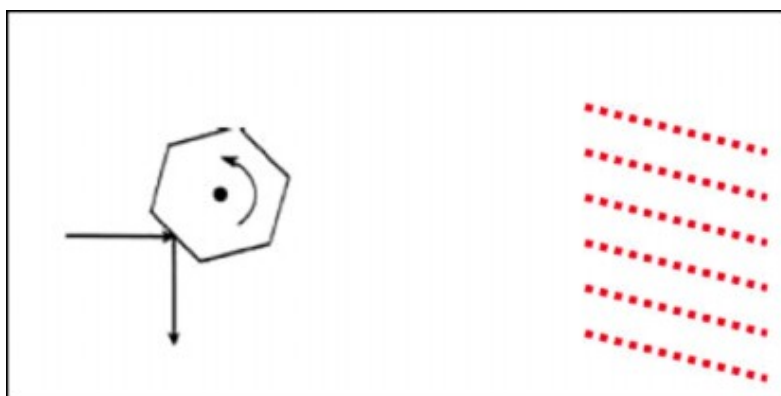
Az **oszcilláló tükrös szkennerek** esetében a lézerfény útját egy oszcilláló tükrös törli meg és irányítja a mérendő terület felé (3-12. ábra). A pásztázás folyamatos és kétirányú, azonban a tükrös megállításához és forgásirányának megváltozásához szükséges lassítás miatt a mért pontok távolsága a pásztázott sáv szélé felé csökken és a pontok cikcakk vonalat alkotnak a felszínen. Ez a probléma a galvanométer alkalmazásával

kompenzálható. A nyílásszög egyszerű változtathatóságának köszönhetően leggyakrabban ilyen típusú rendszereket alkalmaznak (pl. Leica, Optech szenzorok).



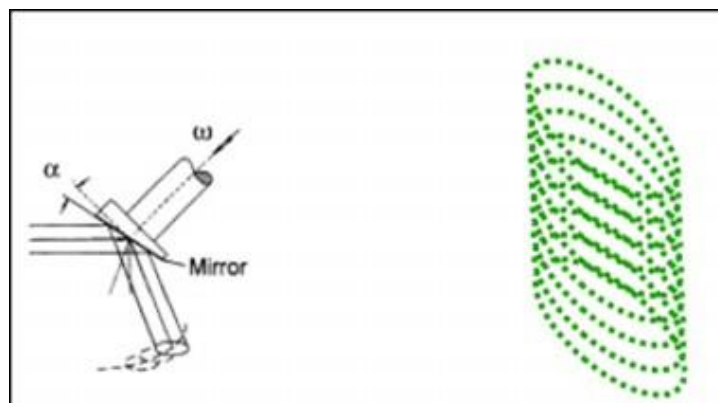
3-12. ábra Oszcilláló tükrös szkennerek működési elve és a mért pontok elhelyezési sémája. Forrás: http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm

A **forgó-poligont** alkalmazó szkennerekben a fény irányának eltérítését olyan forgó poligon végzi, amelynek oldalai tükrök (3-13. ábra). A poligon forgása egyirányú. Ennek következtében a pontok mérése egy irányban történik, a tükrök forgásának megfelelően. A mért pontok sorozatai párhuzamos vonalakat alkotnak a terepen. Ez a pásztázási megoldás szolgáltatja a leghomogénebb ponteloszlást.



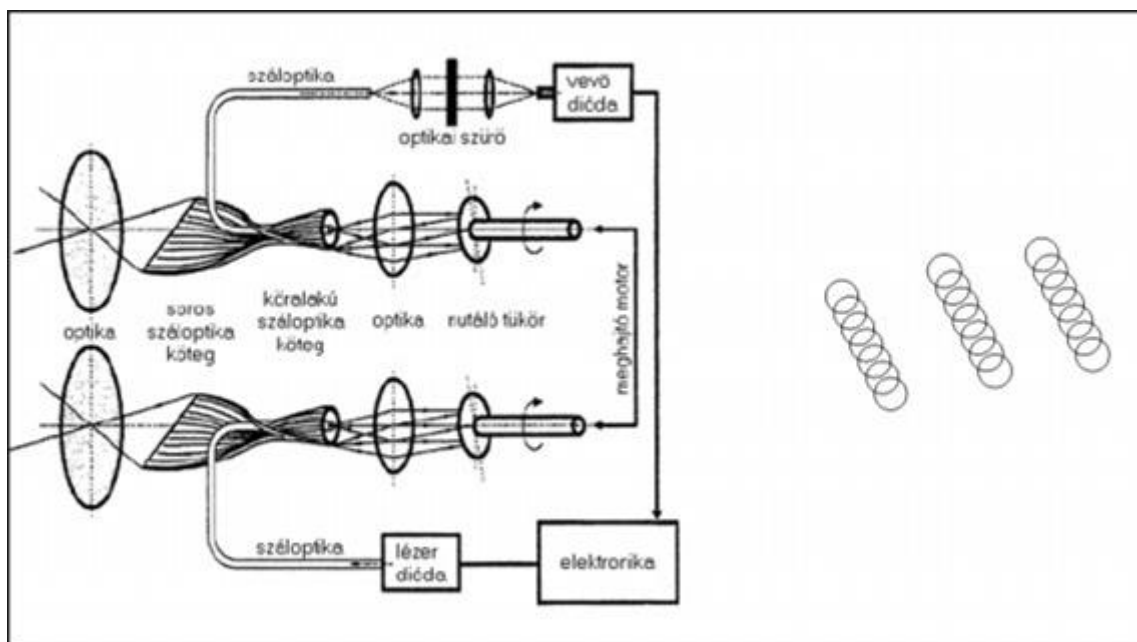
3-13. ábra Forgó-poligon szkennerek működési elve és a mért pontok elhelyezési sémája. Forrás: http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm

Nutáló tükrös szkennerek esetében a lézertükröt nutáló mozgást végző tükrök irányítják a felszín felé (3-14. ábra). A tükrök a forgórész forgástengelyére közel merőlegesen van felépítve, a forgástengely és a lézertükrök irány 45° -os szöget zár be. A tükrök és a forgástengelyre merőleges sík által bezárt szög növeli a fény törésszögét és a fény irányának nutációját eredményezi. A mérési pontok egy jellegzetes ellipszishez hasonló alakzatban helyezkednek el. A pásztázás jellegéből adódóan egy bizonyos idő elteltével a már mért pontok (vagy közeli pontok) újra felmérésre kerülnek, először az előre felé irányuló, majd a hátrafelé irányuló mozgás során. Ezek a kétszer szkennelt pontok a kalibrálás során felhasználhatók.



3-14. ábra Nutáló tükrös szkennerek működési elve és a mért pontok elhelyezési sémája. Forrás: http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm

Az **optikai szál** megoldásban az impulzusokat optikai szálak bocsátják ki és gyűjtik be. A kibocsátott impulzus egy nutáló mozgást végző tükorről verődik vissza és a körben elrendezett optikai szálak egyikére esik, amely továbbvezeti a mérés irányába. A visszaverődött impulzusok begyűjtése ugyanezzel a módszerrel történik. Az optikai szálak elrendezése biztosítja, hogy a szkennelt vonalak párhuzamosak legyenek és egymástól egyforma távolságban helyezkedjenek el a felszínen (3-15. ábra). Az optikai szálak megoldást a Toposys rendszerekben alkalmazzák. Ez a leggyorsabb szkennerek képesek másodpercenként 83000 pontot mérni. A repülési irányban mért pontok sűrűsége többszöröse lehet az arra merőlegesen mértékének.



3-15. ábra Az optikai szálak pásztázás működési elve és a mért pontok elhelyezési sémája. Forrás: Barsi Á. Et al., 2004

5. 3.5 LIDAR szenzorok és technikai paramétereik

Az adatgyűjtésre használt lézereenergia alapú rendszerekre több név terjedt el. Európában például legjobban a légi lézeres szkennelés, a világ más területein pedig inkább a légi LIDAR elnevezésnek gyakoribb a használata. A szakirodalomban a leggyakrabban a következők találhatók (Kraus K., 2007):

ALM – Airborne Laser Mapping (Légi lézeres térképezés)

ALS - Airborne Laser Scanning (Légi lézeres pásztázás)

LIDAR – Light Detecting and Ranging (lézeres felmérés)

Különböző gyártók által használt elnevezések:

ALTM - Airborne Laser Terrain Mapping (TopoSys GmbH, Németország, Optech Kanada)

ALAMS - Airborne Laser Altimetry Mapping System (Eurosense, Belgium)

GGL Airborne Laser Profiler System (ETH Zurich, Svájc)

FLI-MAP -Fast Laser Imaging Mobile Airborne Platform (Fugro-Inpark Hollandia)

Saab **TopoEye** (Saab, Svédország)

A lézeres technológia és a lézeres távérzékelési szenzorok fejlesztésével, gyártásával és forgalmazásával több cég foglalkozik (3.1 táblázat). Az általuk gyártott és forgalmazott szenzorok eltérő paraméterekkel, technikai tulajdonságokkal rendelkeznek, és alkalmasak olyan széles skálájú adatok gyűjtésére, melyek legszélsőségesebb

igényeket is képesek kielégíteni. A szenzorok egyes paramétereit programozhatók, változtathatók és összefüggésben vannak a felmérés körülményeivel. Ennek tipikus példája a felmérés pontossága, mely szorosan függ össze a pozíciót és helyzetet (GPS/INS) meghatározó műszerekkel, továbbá a repülés magasságától és a tárgy reflektivitásától is függ. A mért pontok sűrűsége (pont/m²) egy adott repülési magasság mellett a repülés sebességétől és a szkennelési sebességtől függ.

A fent felsorolt rendszerek mindegyike tartalmazza a lézerszenzort, a navigációs rendszert (GPS) és a rendszert stabilizáló egységet (inerciális navigációs rendszert – INS). A LIDAR rendszerek nagyon gyakran fel vannak szerelve a látható és a közeli infravörös spektrum tartományban működő képalkotó felvevővel (3-2. táblázat), így a lézeres felméréssel párhuzamosan színes (RGB) és hamis-színes (CIR) képek is készíthetők.

Néhány rendszer fontosabb paramétereit 3-1. táblázat tartalmazza.

3-1. táblázat - Néhány LIDAR rendszer fontosabb paramétereit. Forrás: <http://www.optech.ca/altmhow.htm>, <http://www.toposys.com/>, http://www.xyz.au.com/members/intelligence/pdf_files/LIDAR.pdf

Műszer/gyártó	TopEye/ Saab Surrvey System	ALTM 3100EA/ Optech	ALTM 4036/ TerraPoin t	FALCON III/ TopoSys	FLI-MAP 4000/ Fugro- Impark	ALSSO-II/ Leica Geosystems
paraméter						
Szkennelési mód	2 oszcilláló tükör	Oszcilláló tükör	Forgó poligon	Optikai szál	Nutáló tükör	Oszcilláló tükör
Hullámhossz (nm)	1 064	1 047	1 062	1 560	1 500	1 064
Impulzus kibocsátási sebesség (kHz)	1-50	33 – 100 (programozható)	0 - 40	50 - 125	250	150
Szkennelési sebesség (Hz)	0-75	0 – 70 (programozható)	0 - 100	165 - 415	150	90
Műszer nyílásszöge (°)	28	0 -50 (programozható)	36	28	60	60
Impulzushossz (ns)	4	7	7	5	4	< 9
Nyaláb divergencia (mrad)	1	0,8; 0,25; 0,15	1	0,7	0,45	0,22
Repülési magasság max. (m)	2000	2000	600 - 2500	2500	400	200 - 6000

Mért visszaverő dések száma	1,...8. vagy teljes jelalakos	1.,2.,3. és utolsó	1.,2.,3. és utolsó	1.,2.,3. és utolsó	1,...8. vagy teljes jelalakos	1.,2.,3. és utolsó
-----------------------------	-------------------------------	--------------------	--------------------	--------------------	-------------------------------	--------------------

3-2. táblázat FALCON III (TopoSys) rendszerbe beépített képkészítő felvevő paraméterei. Forrás: <http://www.toposys.com/>. táblázat - FALCON III (TopoSys) rendszerbe beépített képkészítő felvevő paraméterei. Forrás: <http://www.toposys.com/>

Műszer nyílás szöge (°)	30
Műszer spektrális érzékenysége	a látható (3 sáv:R,G,B) és a közeli infravörös (1 sáv: NIR) spektrum tartományban
Pixel szám/ sor	4x2048
Pixel méret (m)	< 0,05
Felvételezés méretaránya	1:500 – 1:10 000

6. 3.6 A LIDAR mérések feldolgozása

A LIDAR rendszerek által kibocsátott lézermimpulzus visszaverődésének mérése során rögzítésre kerülnek a köztes visszaverődési értékek is, amelyek zavaró hatással lehetnek az adatok kiértékelésére. A nyert adatok feldolgozása során a zavaró zajok szűrhetők és szelektálhatók. Továbbá az adott szakterület igényeinek megfelelően az adatok szelektálhatók, kiemelhetők. Az alkalmazásra kerülő adatok minőségét alapvetően a feldolgozás határozza meg. Az adatok számítógépes feldolgozása az egyik kritikus és kulcsfontosságú része a mért pontok koordinátáinak pontossága. A mérések pontossága nem lehet jobb a szenzor helyzetének pontosságánál. A meghatározásnál figyelembe kell venni a rendszer kalibrációs adatait (lézerszenzor - INS és GPS-INS relatív helyzetét) és a műszer helyzetét jellemző paramétereit (ω , φ , κ), (Barsi Á. Et al., 2004). Általánosságban elmondható, hogy a lézeres pásztázással nyert mérések horizontális irányú pontossága 20 - 30 cm, vertikális irányú pontok sűrűsége pedig 5 - 10 cm (Barsi Á. et al., 2004).

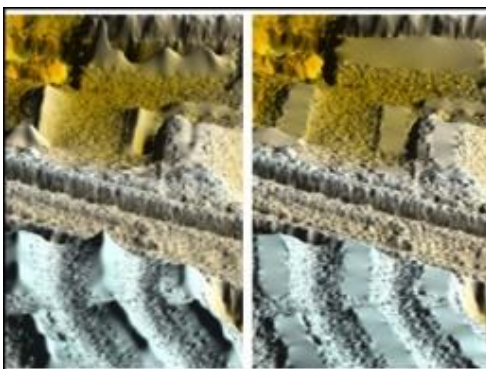
Mérési pontok szórt elrendezésének korrigálása

A lézeres mérési pontok térbeli elrendezése - a mérés technikai megoldásaiból kifolyólag – szórt. A szórt pontfelhők szabályos elrendezésű rácpontokká alakítása interpolációs módszerekkel történhet. A leggyakrabban a következő algoritmusok használhatók:

- a legközelebbi szomszéd módszer,
- lineáris interpoláció,
- polinomális interpoláció (http://www.geo.u-szeged.hu/~joe/pub/DDM/ddm_lidar_tananyag.pdf).

A legközelebbi szomszéd módszer alkalmazása esetén az interpolálandó rácpont magasságértéke felveszi a legkisebb távolságra eső szomszéd magassági értéket. A másik két módszer a korrigálandó pont környezetében lévő pontok alapján sík közelítéssel vagy polinomfelület (pl. harmadfokú) meghatározásával számítja ki az új magassági értéket. Az interpolációban eredményesen alkalmazzák a krigelési megoldásokat, hierarchikus (többlépcsős) eljárásokat, valamint Shepard interpolációs módszerét (Barsi Á. Et al. 2003). A következő ábra a Shepard és a legközelebbi szomszéd módszer alkalmazásának eredményét mutatja. A **krigelés** során úgy kívánjuk meghatározni valamely geometriai pont ismeretlen attribútumértékét, hogy olyan súlyozott átlagot képez a más pontokban ismert (mért) attribútumértékekből, mely szórása minimális (<http://hu.wikipedia.org/wiki/Krigel%C3%A9s>). A **hierarchikus (többlépcsős)** eljárás során első lépésben a

terep durva közelítését számítjuk ki, majd az így előállított modell és a mért pontok közötti eltérések alapján a pontok más súllyal szerepelnek (a felszín fölötti pontok kisebb súlyt kapnak) a felszín iteratív újraszámolásában.



3-16. ábra Az interpoláció eredménye Shepard módszer és a legközelebbi szomszéd módszer alkalmazásával.

A lézeres adatok szűrése

A lézerekkel rögzített adatok a felszínre, a felszíni objektumokra (természetes, mesterséges) és a felszínborítására vonatkoznak. A feldolgozás során az adatokat – a felhasználás céljának figyelembevételével - szelektálni kell. A szűréssel különválasztjuk a földfelszíni pontokat az azon található objektumoktól. Természetesen a felszíni objektumok mint pl. fák, épületek, távvezetékek, a különböző szűrési módszerekkel egymástól elkülöníthetők. A gyakorlatban alkalmazott szűrések a következőkben foglalhatók össze (Barsi Á. et al, 2004):

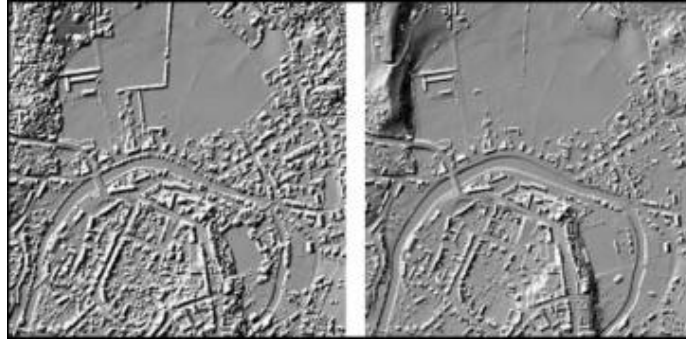
- a hierarchikus robusztus módszer,
- a lejtésen alapuló szűrő,
- morfológiai szűrő.

A **hierarchikus robusztus módszer** első lépésben a terep durva közelítését számolja ki, majd a modell és a mért pontok közötti eltérések alapján a pontokat súlyozza. A további számításban a felszín és az ennél alacsonyabb pontok nagyobb súllyal szerepelnek, mint a felszín fölötti pontok. A felszín újraszámítása a pontok súlyának figyelembevételével, iteratív eljárással történik. Egyes lépésekben a kiugró pontok - melyek egy meghatározott értéknél magasabban vannak - kikerülnek az adathalmazból. Az iterációk száma előre meghatározható, vagy a lépéssorozat addig ismétlődik, amíg a durva hibák jelen vannak. Ennek az algoritmusnak az alkalmazásával az adatok válogatása, ritkítása és szűrése is elvégezhető.

A **lejtésen alapuló szűrő** alkalmazásával az egymáshoz közeli pontok magasságkülönbségét vizsgáljuk és feltételezzük, hogy a nagy eltéréseket nem a terep meredeksége okozza, hanem abból adódik, hogy a magasabban fekvő pont nem tereppont. A terephez tartozó pontok halmaza - a terepadottság figyelembevételével - egy függvénnyel (pontok távolsága alapján) definiálható. Abban az esetben, ha a terepadottság ismeretlen akkor a függvény a tanulóterület alapján definiálható. A tanulóterületnek tartalmaznia kell a fontosabb terepadottságokat és csak terepi pontokat tartalmazhat.

A **morfológiai szűrő** értelmében a tereppontok kiválasztása során egy változó nagyságú ablak végigpásztázza a vizsgált területet. A pontok szűrése az ablak méretének növekedésével ismétlődik. Az ablak által lefedett pontok közül a legalacsonyabban fekvőt tereppontként azonosítja, valamint az egy megadott magasságkülönbségen belüli pontokat is a tereppontok halmazába sorolja. A kiválogatott pontok az ablak méretétől függően más-más súllyal szerepelnek a végleges terepmodell generálásában.

A fent felsorolt automatikus módszerekkel elvégzett szűrés, szelektálás nem mindig elegendő az adatok gyakorlati felhasználásához. Az eredmények utólag manuálisan tovább javíthatók, vagy más forrásból származó adatokkal (pl. ortofotókkal) kiegészíthetők. A szűrés hatásfokának növelése elérhető az objektumok felismerésén alapuló eljárásokkal. Ezek az eljárások az osztályozásnál figyelembe veszik az objektumokat jellemző olyan paramétereket, mint pl. nagyság, alak, stb.



3-17. ábra Az első és az utolsó visszaverődés megjelenítése

7. 3.7 A LIDAR alkalmazási lehetőségei

A légi lézerszkennelés eredménye a georeferált ponthalmaz, amely a felszín és a felszínen lévő objektumok (épületek, távvezetékek, fák, stb.) magassági értékeit jelenti. Jelenleg a LIDAR rendszerek a kibocsátott lézernyalábból eredő első és utolsó, valamint több köztes visszaverődést is tudnak rögzíteni. A szenzorok legújabb generációja továbbá a lézerimpulzus teljes jelalakjának regisztrálására is képes. Ezek a technikai megoldások lehetővé teszik nagysűrűségű adatok felvételezését. A LIDAR szenzorok képesek a visszaverődés intenzitását (un. lidar intenzitását) is mérni. A visszaverődés értéke az x,y,z koordinátájú mérési pont spektrális tulajdonságaitól függ. Például a hóval borított terület reflektanciája 90%-os, ezzel szemben az aszfalt reflektanciája csak 5%. Az intenzitási értékekből georeferált raszteres képek állíthatók elő, melyek segítséget nyújthatnak az adatok feldolgozásában, a vizsgált terület használatának meghatározásában, a felszíni objektumok azonosításában.

A LIDAR alkalmazásának előnyei és korlátai

A lézeres adatnyerés gyorsasága (másodpercenként több ezer mérés is lehetséges), mérési pontok sűrűsége (m^2 -ént több mérés), illetve felmérés pontossága a más módszerekkel nyert adatokkal szemben olyan nagy előnyt jelent, hogy jelenleg a LIDAR-os felméréseket egyre több területen alkalmazzák. A LIDAR-nak a pontosság mellett számos más előnye is van. A technológia lényegesen kevésbé időjárásfüggő, mint a hagyományos mérőkamerás légifényképezés. A LIDAR felvételeket bármelyik napszakban elkészíthetjük, azok minősége nem függ a napállástól (árnyéktól), sőt az éjszaka kimondottan kedvező a munkák számára.

A LIDAR alkalmazásának előnyei és nehézségei a következőkben foglalhatók össze:

Előnyei:

- Aktív rendszer (rendelkezik saját energiaforrással), így teljesen független a természetes megvilágítástól és napszaktól, a felmérések éjszaka is kivételezhetők.
- Teljes felhőborítás esetén is elvégezhető a felmérés, amennyiben a repülés magassága nem haladja meg a felhőzet aljátát. Nagyon erős esőzés és köd azonban akadályozza a lézerefény terjedését.
- A lézereenergia képes áthatolnia a növényzetten. Sűrű mintavételezés mellett, az adatok feldolgozása során viszonylag könnyű elkülöníteni a fakorona és a felszín visszaverődését. Ennek a különleges jellemzőnek köszönhetően a lézeres technológia alkalmazható pl. erdős területek topográfiai felmérésére (DDM létrehozása).
- Az adatok nagy pontosságúak mind vertikális, mind horizontális irányban.
- A rövidebb hullámhosszúságú lézereenergia (kék, zöld tartomány) használható a vízmélység és víztestek medrének felméréséhez.

Nehézségei:

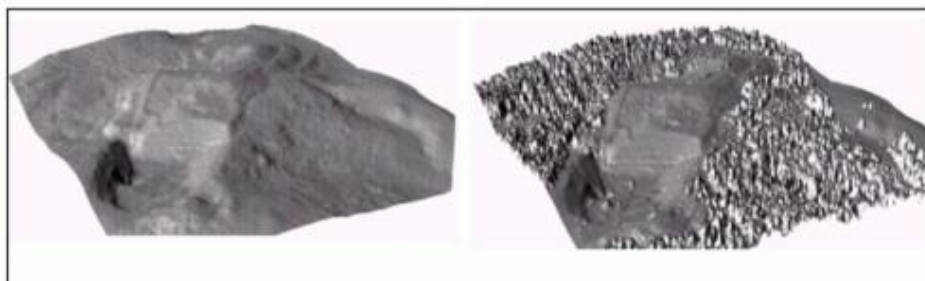
- Nincs visszaverődés a vízfelszínről, ami megnehezíti a partvonal azonosítását.
- A légköri inhomogenitások befolyásolják a detektálást.

- Magas eszköz- és üzemeltetési költség (bár a mérések költséghatékonysága rendkívül nagy).
- Új technológia: az adatok feldolgozása csak félig automatizálható (manuális munka is szükséges), speciális szakértelmet igényel, nincs szabványosítva.

7.1. 3.7.1 Digitális felszínmodellek előállítás

A terepi információ gyűjtésének leghatékonyabb módja a távérzékelés. Jelenleg a nagyméretarányú topográfiai térképészetben meghatározó a mérőkamerás légifényképezés alkalmazása. Gyors technikai fejlődésének köszönhetően azonban a térképészetben a műholdas távérzékelésnek egyre nagyobb szerep jut. Ez egyrészt a felvételek egyre nagyobb felbontásának, másrészt pedig a sztereo felvételező rendszerek kifejlesztésének köszönhető. A lézeres adatnyerési eljárás bevezetése, az adatnyerési hatékonyság mellett a térbeli mérések minőségi javulását hozza magával. A lézeres technológia az adatnyerés gyorsasága, sűrűsége és pontossága szempontjából a leghatékonyabb. Már egyetlen felmérésből tér adatok nyerhetők.

A lézeres adatgyűjtés célja leggyakrabban a felszínre és felszíni objektumokra vonatkozó térbeli adatok nyérése. Ezek az adatok a nagyfelbontású **digitális domborzatmodell (DDM, angolul: Digital Terrain Model – DTM)** és **digitális felszínmodell (DFM, angolul: Digital Elevation Model)** előállítására használhatók. A DDM a **topográfiai felszín tereptárgyak nélkül mért magassági adatokat tartalmazza** a DFM pedig **magában foglalja a tereptárgyak magasságát** is (3-18. ábra).



3-18. ábra LIDAR adatokból generalizált DDM (az utolsó visszaverődés) és DFM (az első visszaverődés).

A topográfiai célú, háromdimenziós adatnyerés legjobb módszerének a légi lézeres szkennelés bizonyult. A lézerek képesek a felszínborításon (pl. erdőborítás esetén a korona szinten) áthaladva eljutni a földfelszínig és innen visszaverődik. Így egy impulzus visszaverődése - magassági törések esetén – több részletben rögzíthető. A felszíni adatokat az utolsó visszaverődés hordozza. A felületi adatok pedig az első visszaverődésből állíthatók elő. A DDM vagy DFM modellek előállításának egyik kritikus lépése a felszíni és nem-felszíni mérési pontok elválasztása. A modellek minősége továbbá erős összefüggésben van a modellek generalizálása során alkalmazott interpolációs módszerekkel. A LIDAR rendszerek felhasználásával előállított domborzatmodellek pontossága eléri a repülési magasság 1/8 000 részét. Így például 1 200 méter repülési magasság esetén 15 cm, 6 000 méter esetén 75 cm pontosság érhető el (Alabér L., év?). A LIDAR-nak a pontosság mellett számos más előnye is van. A mért pontok sűrűségéből adódóan a felszínről szinte folytonos adatokat nyerünk. Az adatgyűjtés és feldolgozás gyorsaságával ez a technikai módszer a többi hagyományos módszernél hatékonyabb.

A LIDAR adatok alkalmasak az erdővel borított, beépített területek, nehezen megközelíthető területek modelljeinek előállítására. A lézeres adatok lehetővé teszik a kis magasságkülönbséggel rendelkező területekről precíz DDM előállítását, ami más technológiával nem érhető el.

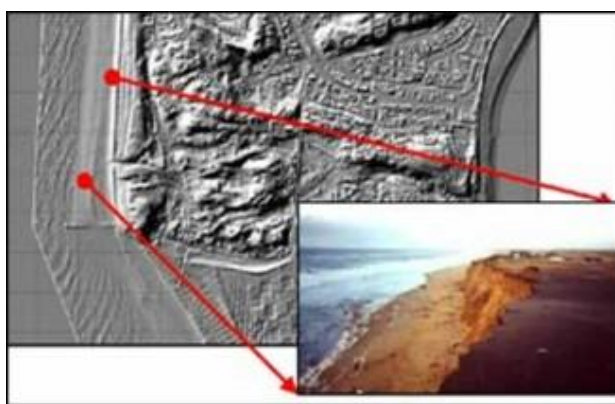
A DDM és DFM modellek alkalmazásának példaterületei:

- az út-, vasút-hálózat tervezése,
- magas feszültségű vezetékek, távvezeték hálózat tervezése,
- földalatti vezetékek tervezése,
- térbeli tervezések,
- árvízi helyzet modellezése, lefolyás modellek számítása.

7.2. 3.7.2 Partvonalak felmérése

Az erózió, mint a talaj degradáció egyik típusa nemcsak mezőgazdasági területeken lép fel, de nagyon komoly problémát okozza partvidékeken is. Az erózió során elmozdult talaj a lerakódás helyén (lehet az szárazföld, vagy élő víz) szedimentációt okoz. A víz által szállított talaj az élő vízbe kerülve a meder változását eredményezi, illetve a nitrogén és a foszfor tartalma miatt a víz szennyeződését, a biológiai folyamatok változását is eredményezheti. Az erózió elleni védekezés, a folyamat lassítását célzó beavatkozások az érintett területek aktuális, pontos felmérését igénylik. Ennek végrehajtásában a LIDAR-os pásztázásnak egyre nagyobb szerepe van. Példaként bemutatható a németországi Sylt partjának monitoringja (3-19. ábra), melynek során a part változását folyamatosan LIDAR-os felmérések segítségével követik nyomon. Az adatokból előállított DDM modellek a part vonalának térbeli változását pontosan tükrözik. A téli viharok után a topográfiai felmérésekkel párhuzamosan - víz mélységmérő segítségével - a tenger mélységét és a meder domborzatát is mérik. Ez lehetővé teszi az erózió és a szedimentáció mértékének meghatározását, valamint a szedimentáció hatására feltöltött területek azonosítását (mederváltozás felmérését).

A tengeri partvidékre jellemző felületkoptató eróziós (abrázió) folyamat és dinamikájának rendszeres vizsgálatát Hollandiában is LIDAR-os adatok alapján végzik.

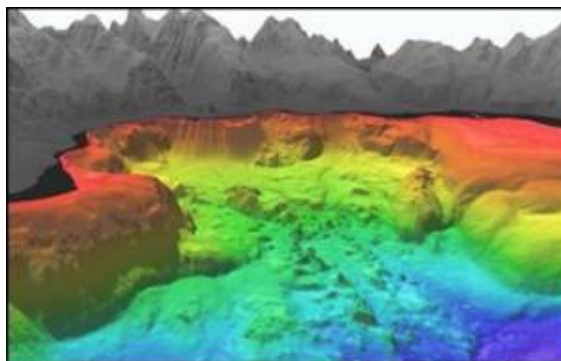


3-19. ábra Sylt sziget LIDAR DFM-je és földi referencia kép. Forrás: <http://www.gisdevelopment.net/technology/rs/ma03234a.htm>

Ilyen jellegű mérési adatokat felhasználtak továbbá a vízgazdálkodásban, az árvízvédelmi tervezésekben és az árvízvédelmi rendszerek építésében (árvíz által veszélyeztetett területek kijelölése, a hullámok terjedésének szimulálása, a vízelvezetési alternatívák vizsgálata), az infrastruktúra tervezésében, a területrendezésben, a környezeti hatások vizsgálatában, stb.

7.3. 3.7.3 A vízmélység mérés

A lézer technológia egyik speciális felhasználási területe a vízmélység mérés. A mélységmérő LIDAR-ok a látható spektrumtartomány kék és zöld sávjában működnek. Kedvező körülmények között (alapvetően a víz tisztaságától függően) a lézerenergia 70 m-es mélységbe is eljut, és használható a meder topográfiai mérésekre. A partvidék vizsgálatához gyakran ún. hibrid LIDAR rendszereket alkalmaznak, melyek mind a közeli infravörös, mind a látható spektrum zöld szakaszában is működnek. A NIR energia felhasználható a föld- és vízfelszín visszaverődési pontok méréséhez. Az energia zöld tartománya pedig a vízmélység (meder topográfia) mérését teszi lehetővé. A hibrid rendszerek alkalmazásával egyidejűleg mérhető a földfelszín és a víztestek medrének topográfiája (3-20. ábra).



3-20. ábra A mélységmérő LIDAR eredményeinek megjelenítése –a víztest medrének domborzata. Forrás: <http://pl.wikipedia.org/wiki/LIDAR>

7.4. 3.7.4 Városi modellezés

A lézeres mérési technológia a leghatékonyabb adatgyűjtési módszernek bizonyult a városi területek felmérésében. Az urbanizáció, iparosodás és vele járó infrastruktúra gyors fejlődésével szükségessé váltak az épületekre, a terepre, terepi tárgyakra vonatkozó naprakész, pontos és megbízható háromdimenziós adatok. A georeferált, nagy sűrűségű (5 pont/m²) mérési pontok alapján modellek készíthetők, melyek részletes információt adnak a terület domborzatáról és felszínborításáról. A lakó- és ipari területek digitális megjelenítése a tervezésben és építészetben egyre fontosabb szerepet játszik, csak úgy, mint az infrastruktúra tervezésében. A modellek segítségével például a mobiltelefon tornyok optimális elhelyezése tervezhető, a zaj terjedése is modellezhető. A periodikusan ismétlődő mérési adatok az érintett területen végbemenő változások nyomon követéséhez, monitoringjához használhatók fel. A más forrásból származó adatok együttes felhasználásával, mint például légifényképek vagy nagyfelbontású űrfelvételek és lidaros mérési pontok, valóság-hű, megjelenítések – virtuális valóság - állíthatók elő (3-21. ábra).



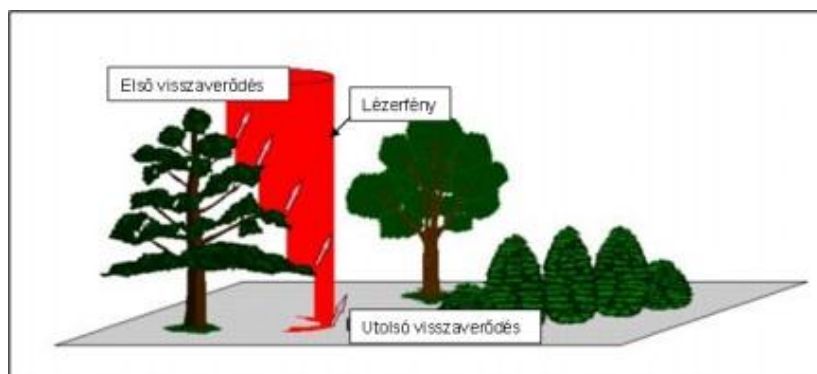
3-21. ábra Beépített területnek megjelenítése lézeres DFM és ortofoto felhasználásával.

A város modellezés eredményei a következő speciális területeken használhatók fel:

- az épületek térképezése és magasságuk felmérése,
- tervezett épületek és környezetükk szimulálása,
- a meglévő adatok felújítása,
- zöld területek, rekreációs területek felmérése,
- infrastruktúra fejlesztése,
- adatforrás GIS adatbázis részére.

7.5. 3.7.5 A LIDAR erdészeti alkalmazásai

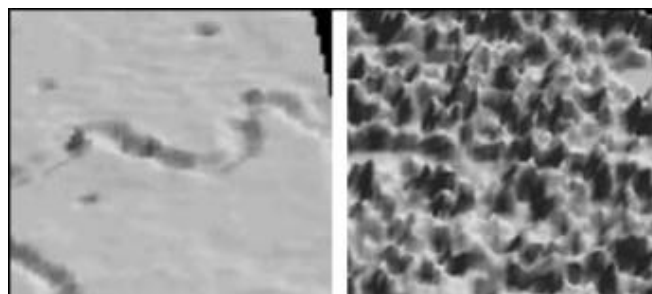
Az erdőgazdálkodás, leltározás illetve monitoring az erdővel borított területek fajokra vonatkozó információinak és az erdőállomány mennyiségi és minőségi jellemzőinek ismeretét igényli. Ehhez a távérzékelési adatokat az erőforrás kutató műholdak megjelenése óta eredményesen alkalmazzák. A passzív távérzékelési rendszerek és radarok - széles skálájú spektrális és geometriai felbontás mellett - alapvetően kétdimenziós adatokat biztosítanak. Egyes felmérésekhez azonban, mint pl. a famagasság meghatározásához és a fatömeg becsléséhez szükség van magassági adatokra is. A magassági értékek sztereo felvételekből nyerhetők. A lézeres technológia nagy előnye, hogy egy mérés helyzeti (x,y) koordinátái mellett magassági (z) értéket is tartalmaz. A LIDAR-os felmérés során a kibocsátott impulzus egy része a fakoronáról reflektálódik, míg egy része eljut a földfelszínig és innen verődik vissza (3-22. ábra).



3-22. ábra Egy lézernyaláb többszörös visszaverődése erdős területen. Forrás:

<http://images.google.hu/imgres?imgurl=http://www.toposys.com/toposys-de/lidar-systems/images>

A mérési pontok a felhasználás céljától függően szűrhetők, szelektálhatók. A légi lézerekkel történő technológia nemcsak a távérzékeléssel nyerhető adatok mennyiségi és minőségi javítását jelenti, de olyan új alkalmazási lehetőségeket is nyújt, melyek azelőtt nem, vagy csak nehezen voltak megoldhatók. Például a lézeres adatokból erdős területre DDM modellek generálhatók, különböző szintű (koronaszint, bokorszint) felületi modellek állíthatók elő (3-23. ábra).



3-23. ábra Az utolsó visszaverődés adataiból erdős területen generalizált DDM és az első visszaverődés adataiból generalizált DFM. Forrás: http://www.cfr.msstate.edu/forestry/SITL/sitl_ikuko/vis_ikuko.htm

A fák magassága két modell (DFM; DDM) különbségéből számítható. Ehhez azonban mérési adatok között szűréssel el kell különíteni a helyi maximális értékeket, melyek azonosíthatók a fák korona csúcsaival. A fák interpretálása céljából a LIDAR adatokat gyakran multispektrális felvételek felhasználásával egészítik ki.

Az erdőállományra vonatkozó lézeres adatokból a következők paraméterek határozhatók meg:

- fák magassága
- korona nagysága, sűrűsége
- ismétlődő mérések esetén erdő növekedése követhető
- biomassa becslés

A lézeres adatok az alábbiakra is felhasználhatók:

- útvonal, távvezeték térképezése, tervezése

- természetes, ember tevékenysége által kiváltott katasztrófák esetén gyors adatnyerés
- kárfelmérés

7.6. 3.7.6 Egyéb alkalmazási területek

LIDAR-os felmérések alkalmazása a légszennyeződés vizsgálatában

A lézeres távérzékelés (LIDAR) során a levegőbe rövid lézerpulzust bocsátanak ki. A légszennyeződéseken a lézerpulzus szétszóródik. A visszajutó fény intenzitását, és annak időbeli lefutását a lézer közelében lévő fénydetektor regisztrálja. A visszajutó fény intenzitása a szennyeződés koncentrációjával arányos. Ismerve a fény terjedési sebességét, a jel időbeli alakjából kiszámítható a szóró centrumok távolsága a detektortól. A visszajutó fény színéből pedig a légszennyeződés kémiai összetétele azonosítható. Ilyen módon a szennyeződések térbeli eloszlása, koncentrációja és anyagi minősége meghatározható. LIDAR-ral különböző légszennyeződések, a magaslégköri ózon mennyisége, továbbá a szélsébség, sőt a hőmérséklet is megmérhető.

Vonalas létesítmények térképezése

A lézeres technológiával nyert pontos, rendkívül sűrű térbeli adatok több speciális területen is alkalmazhatók, mint pl. az infrastruktúra karbantartása és fejlesztése. Ezen a területen az alkalmazási lehetőségek a következőkben foglalhatók össze:

- lineáris létesítmények (csővezetékek, nagyfeszültségű távvezetékek) felmérése és térképezése
- nagyfeszültségű távvezetékek nyomvonalában és a környezetében bekövetkezett változások monitoringja
- nagyfeszültségű távvezetékek süllyedésre vonatkozó adatok nyérése
- tornyok felmérése
- tervezés, karbantartási munkálatok
- fejlesztési tervek optimalizálása

8. 3.8 Összefoglalás

A tananyag elsajátításával Ön megismeri a lézeres adatnyerési technológiát, a lézeres mérési adatok kedvező tulajdonságait, melyeknek köszönhetően ez az adatnyerési mód egyre szélesebb körben kerül alkalmazásra. Betekintést nyert a LIDAR adatok feldolgozásába és megismerte a főbb alkalmazási területeket.

Önellenőrző kérdések

1. Sorolja fel a lézersugárzás tulajdonságait!
2. Milyen elven működik egy tipikus LIDAR?
3. Milyen egységekből épül fel egy LIDAR felvevőrendszer?
4. Milyen szerepe van a GPS és az INS technológiának a LIDAR-os felmérésekben?
5. Sorolja fel és röviden jellemezze lézeres rendszerek típusait!
6. A tananyag alapján foglalja össze a lézeres technológiával nyert adatok tulajdonságait!
7. A lézeres adatok jellegéből adódóan milyen előfeldolgozási műveleteket kell elvégezni az adatok gyakorlati alkalmazása előtt?
8. Milyen új alkalmazási lehetőségeket adnak a lézeres felmérések a digitális felszínmodellek előállításában?
9. Mit tud a LIDAR adatainak erdészeti alkalmazásairól?

10. Foglalja össze a LIDAR alkalmazási lehetőségeit az infrastruktúra fejlesztésében és a város modellezésében.

Irodalomjegyzék

Alabér L. : <http://www.otk.hu/cd03/5szek/Alab%C3%A9rL%C3%A1szl%C3%B3.htm>

Kecik J. : *LASERY podstawy fizyczne, Warszawa* , 2006

Kraus K. : *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans, Berlin-New York* , 2007

Székely B., Molnár G., Roncat A.I : *Domborzat- és felületmodellek teljes jelalakos légi lézerszkenneléssel* , <http://www.fomi.hu/honlap/magyar/szaklap/2007/12/2.pd>

LIDAR alapjai , <http://femto.chem.elte.hu/kinetika/Laser/Laser.htm>

Lézer működésének alapjai , http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2005_cikkek/nanai_laszlo.pdf

Elektromágneses spektrum, CCRS Tutorial , http://www.fomi.hu/taverzekeles_oktatoanyag/taverzekeles/elektromagnesesspektrum.htm

Interpoláció , http://www.geo.u-szeged.hu/~joe/pub/DDM/ddm_lidar_tananyag.pdf

LIDAR , http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm

LIDAR , http://www.ihc.fiu.edu/lcr/research/windstorm_simulation/airborne_lidar_mapping.htm

LIDAR , <http://pcl.physics.uwo.ca/pclhtml/introlidar/introlidarf.html>

LIDAR fizikai alapjai, alkalmazása , http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm

Lézer rendszer , <http://www.atomnet.pl/~geodeta/1999/45text.htm>

LIDAR, adat feldolgozás , https://www.e-education.psu.edu/geog883/15_p8.html

Felmérési pontosság , http://www.fmt.bme.hu/fmt/oktatas/feltoltesek/BMEEOFT-V98/las3_010.ppt

Felmérési pontosság , http://www.geo.u-szeged.hu/~joe/pub/DDM/ddm_lidar_tananyag.pdf

TopoSys GmbH (2004) : *FALCON, LIDAR Sensor System* , Biberach , <http://www.toposys.com>

Fizikai alapok , http://www.fomi.hu/taverzekeles_oktatoanyag/taverzekeles/elektromagesesspektrum.htm

Lézeres letapogatás technikai megoldások , http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm