

## **REMOTE SENSING OF OIL SPILLS ON A SEA WITH INFRARED CAMERAS**

### **Summary**

The main sources of marine oil pollution are releases from ships. Large spills of oil in the marine environment can have serious biological and economic impacts. Remote sensing is playing an increasingly important role in extent of the oil spill be identified. Through the use of modern remote sensing instrumentation, oil can be uncovered on the open ocean very quickly. With knowledge of slick locations and movement, responsible personnel can more effectively plan countermeasures in an effort to lessen the effects of the pollution.

This paper considers advantages and disadvantages of the utilization of infrared cameras for airborne remote sensing of marine oil pollution.

*Key words:*      *remote sensing, marine oil pollution*

## **DALJINSKO OTKRIVANJE NAFTNIH MRLJA NA MORU S INFRACRVENIM KAMERAMA**

### **Sažetak**

Glavni izvor onečišćenja mora naftom dolazi od brodova. Velike mrlje nafte u morskom okruženju mogu imati ozbiljan biološki i ekonomski utjecaj. Daljinsko otkrivanje igra sve važniju ulogu u nastojanju da se naftna mrlja identificira. Kroz uporabu modernih uređaja za daljinsko otkrivanje nafta se može otkriti na otvorenom moru vrlo brzo. S poznavanjem lokacije i kretanja mrlje odgovorno osoblje može efikasnije planirati protumjere u nastojanju smanjivanja učinka onečišćenja.

Ovaj rad razmatra prednosti i nedostatke u uporabi infracrvenih kamera za daljinsko otkrivanje onečišćenja mora iz zraka.

*Ključne riječi:*      *daljinsko otkrivanje, onečišćenje mora naftom*

## 1. Uvod

Promet nafte i naftnih derivata morem je u porastu, a prema planiranim razvojjima određenih luka na Jadranu za očekivati je i značajno povećanje broja brodova koji prevoze naftu Jadranom. Stoga raste i opasnost onečišćenja mora i to ne samo radi porasta vjerojatnosti izljeva nafte u more u slučaju brodoloma ili težih havarija broda, već poglavito radi ispiranja spremnika brodova nakon iskrcavanja tereta (štetne tekuće tvari koje se ispuštaju u more uslijed operacija čišćenja tanka). Veliki izljevi nafte i naftnih derivata u pomorskom okruženju mogu imati ozbiljne biološke i ekonomske učinke. Javnost i javni mediji obično intenzivno ispituju okolnosti nakon izljeva i zahtijevaju određivanje mjesta i opsega izljeva nafte. Otkrivanje na daljinu igra sve veću ulogu u postupcima otkivanja onečišćenja mora. Pomoću modernih senzorskih uređaja, nafta i naftni derivati na otvorenom moru mogu se otkriti i promatrati 24 sata na dan. Uz poznavanje položaja i kretanja mrlje, interventno osoblje može učinkovitije planirati protumjere u naporu da se umanje učinci onečišćenja.

Dizajn senzora i pripadajuća elektronika sustava za daljinsko otkrivanje postaju sve složeniji i osjetno jeftiniji no operativna uporaba tih sustava ne raste proporcionalno razvoju i pojeftinjenju tih sustava. U daljinskom otkrivanju koristi se senzor, koji nije oko ili konvencionalno fotografiranje, kako bi se na određenoj udaljenosti opazio cilj od interesa. Najuoobičajeniji oblici nadgledanja i mapiranja izljeva nafte izvode se jednostavnom nepokretnom ili video fotografijom. Daljinsko otkrivanje iz zrakoplova još je uvijek najuoobičajeniji oblik praćenja izljeva nafte. Nastavljaju se pokušaji korištenja satelitskog daljinskog otkrivanja, no njihova uspješnost nije nužno onakva kakva se tvrdi da jest i obično je ograničena na identifikaciju oblika na lokacijama gdje su se javili poznati izljevi nafte.

## 2. Sustavi za otkrivanje na daljinu onečišćenja mora

Sustave za daljinsko otkrivanje dijelimo prema vrsti senzora koji se koriste u tim sustavima. Uobičajena podjela je na dvije grupe i to na optičke senzore te na mikrovalne senzore. Sustavi temeljeni na optičkim sensorima dijele se prema valnom području rada te tako imamo optičke sustave koji rade u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra, zatim infracrvene sustave koji rade u infracrvenom području i to u dijelu propusnih pojasa atmosfere, zatim tzv. ultraljubičaste te laserske fluorosenzore. Radiometri i radari su sustavi temeljeni na mikrovalnim sensorima.

Optičke tehnike najuoobičajeniji su način daljinskog otkrivanja. Često se koriste foto i video kamere zbog njihove niske cijene. Posljednjih je godina vizualno otkrivanje ili otkrivanje kamerom poboljšano korištenjem sustava za globalno pozicioniranje (GPS). Moguće je izravno pridruživanje video slika s GPS informacijama što daje korisnu dokumentaciju.

U vidljivom području elektromagnetskog spektra (oko 400 nm do 700 nm) nafta ima veću površinsku reflektivnost od vode, ali također pokazuje ograničene nespecifične apsorpcijske značajke. Kako nema jakih signala od naftne mrlje u dijelu spektra od 500 nm do 600 nm, ovo se područje često filtrira kako bi se poboljšao kontrast. Općenito, nafta ipak nema specifičnih karakteristika koje bi je isticale u odnosu na pozadinu. Istraživanja spektra površina onečišćenih naftom i u laboratoriju i na terenu dala su rezultate koji potvrđuju da nije moguće otkrivanje nafte u vidljivom dijelu spektra [1]. Dakle, tehnike koje odvajaju specifična spektralna područja ne povećavaju sposobnost otkrivanja. Ustanovljeno je da se visoki kontrast u slikama može postići postavljanjem kamere pod Brewsterovim kutom (53 stupnja od vertikale) i korištenjem horizontalno postavljenog polarizirajućeg filtera koji propušta samo svjetlo reflektirano s površine vode. To je komponenta koja sadrži podatke o

površinskoj nafti. Izvješteno je da ova tehnika povećava kontrast do 100%. Za poboljšanje kontrasta mogu se koristiti i filteri s propusnošću ispod 450 nm.

Korištenje vidljivog dijela spektra i pripadajućih tehnika u daljinskom otkrivanju izljeva nafte uvelike je ograničeno na poznavanje približne lokacije izljeva jer ne postoji mehanizam za sigurnu detekciju nafte. Nadalje, ima mnogo smetnji ili lažnih uzbuna. Sunčev odbijesak može se zamijeniti za sjaj nafte. Biogenetske tvari poput površinske trave ili potonulih slojeva velikih algi mogu se zamijeniti za naftu. Teško je sa sigurnošću identificirati naftu na obalama jer morska trava nalikuje nafti i nafta se ne može opaziti na tamnijim obalama. Može se zaključiti da je iskoristivost vidljivog spektra ograničena za otkrivanje nafte. Ipak, ona predstavlja ekonomičan način za dokumentaciju izljeva i daje osnovne podatke.

Nafta je optički nepropusna, apsorbira sunčevu energiju i reemitira dio te radijacije u vidu termalne energije, primarno u području od 8 do 14  $\mu\text{m}$ . Na infracrvenim (IC) slikama, gusta nafta izgleda vruće, srednje debljine nafte izgledaju hladne, a tanki slojevi ili izmiješani slojevi se ne otkrivaju. Nisu poznate debljine pri kojima se javljaju ovi prijelazi, ali dokazi ukazuju da prijelaz između vrućih i hladnih slojeva leži između 50 i 150  $\mu\text{m}$ , a najmanji sloj koji se može otkriti se nalazi između 20 i 70  $\mu\text{m}$  [2]. Razlozi pojavljivanja "hladne" mrlje nisu u potpunosti protumačeni. Najprihvatljivija teorija tvrdi da umjereno tanak sloj nafte na vodenoj površini uzrokuje razarajuću interferenciju valova termalne radijacije koje emitira voda, smanjujući tako količinu termalne radijacije koju emitira voda.

Infracrveni uređaji u većini slučajeva ne mogu opaziti emulzije (mješavina vode i nafte) [3]. To je vjerojatno rezultat visoke termalne provodljivosti emulzija, pošto obično sadrže 70% vode i tako ne pokazuju razliku u temperaturi.

Ultraljubičasti (UV) senzori mogu se koristiti za mapiranje površine mora prekrivenog s naftom budući da naftne mrlje pokazuju veliku reflektivnost ultraljubičaste radijacije čak i kod vrlo tankih slojeva (debljine i ispod 0.01  $\mu\text{m}$ ). Čak i tanki slojevi nafte daju jaki signal. Često se koriste ultraljubičaste i infracrvene slike, koje se preklapaju, za dobivanje relativne debljine slojeva naftnih izljeva. Podaci dobiveni ultraljubičastim sensorima također su podložni mnogim smetnjama ili lažnim slikama kao što su mrlje od vjetra, odbijesak Sunca i biogenetski materijali. Pored toga ultravioleto zračenje snažno atenuira kiša, oblaci ili magla. Budući da su ove interferencije često različite od onih za infracrveno motrenje, kombinacija IC i UV metoda može dati sigurniju indikaciju prisustva nafte nego korištenje bilo koje od njih zasebno.

Laserski fluorosenzori su aktivni senzori koji koriste činjenicu da određene komponente u naftnim uljima apsorbiraju ultraljubičasto svjetlo i elektronički se uzbude. Ova se uzbuda brzo ukloni kroz proces emisije fluorescencije, uglavnom u vidljivom području spektra. Pošto vrlo mali broj drugih sastojaka pokazuje ovakvu sklonost, fluorescencija je jaki indikator prisutnosti nafte. Prirodne fluorescentne tvari, poput klorofila, djeluju na dovoljno različitim valnim duljinama od nafte da ne dođe do zabune. Kako različiti tipovi nafte daju blago različite intenzitete fluorescencije to je pod idealnim uvjetima moguće razlikovati vrste nafte [4], [5].

Većina laserskih fluorosenzora za otkrivanje izljeva nafte koriste laser koji djeluje u ultraljubičastom području od 300 do 355 nm. S ovom aktivacijskom valnom duljinom, postoji širok raspon fluorescentnog odgovora na organsku tvar, centriranu na 420 nm. Ovo se naziva žuta tvar, koja se lako može poništiti. Klorofil daje oštri vrh na 685 nm.

Još jedna pojava, poznata pod imenom Ramanovo raspršenje, uključuje prijenos energije između upadnog svjetla i molekula vode. Molekule vode apsorbiraju dio energije kao rotacijsko-vibracijsku energiju i vraćaju svjetlost umanjenu za apsorbiranu energiju. Ramanov signal za vodu javlja se na 344 nm kada je upadna valna duljina 308 nm (XeCl laser). Tzv.

vodeni Ramanov signal koristan je za održavanje kalibracije valne duljine djelatnog fluorosenzora, ali koristi se u ograničenoj mjeri i za procjenu debljine nafte, jer će snažna apsorpcija nafte na površini potisnuti vodeni Ramanov signal proporcionalno s debljinom sloja nafte. Točka pri kojoj je Ramanov signal potpuno potisnut ovisi o vrsti nafte, budući da svaka nafta ima različitu jačinu apsorpcije.

Laserski fluorosenzori imaju znatan potencijal pošto su oni možda jedini način za razlikovanje naftom onečišćenih trava od čistih morskih trava te za otkrivanje nafte na različitim tipovima obala. Ispitivanja uz obale pokazala su da je ova tehnika bila vrlo uspješna [6]. Razvijeni su algoritmi za detekciju ulja na obalama. Fluorosenzor je također jedino pouzdano sredstvo za otkrivanje nafte u određenim situacijama koje uključuju snijeg i led. Nedavni testovi i uporaba pokazuju da je laserski fluorosenzor moćno oruđe za daljinsko otkrivanje izljeva nafte [5].

More emitira mikrovalnu radijaciju no nafta emitira snažniju mikrovalnu radijaciju od vode i stoga se javlja kao svijetli objekt na tamnijem moru. Faktor emisivnosti vode je 0.4 a nafte 0.8. Pasivni uređaj može otkriti ovu razliku u emisivnosti i stoga se može koristiti za detekciju nafte. Uz to, kako se signal mijenja s debljinom, takav bi se uređaj teoretski mogao koristiti za mjerenje debljine sloja nafte. Ipak, ova metoda otkrivanja nije bila vrlo uspješna na terenu, pošto je potrebno poznavati nekoliko parametara vezanih uz okolinu i naftu. Uz to, povratni signal ovisi o debljini nafte. Detektirana snaga signala može implicirati bilo koju od dvije ili tri debljine filma unutar pripadne mrlje. Emisija mikrovalne energije najveća je kada je učinkovita debljina ulja jednaka neparnom višekratniku jedne četvrtine valne duljine promatrane energije. Biogenetski materijali također mogu smetati a odnos signal-šum je nizak. Uz to, teško je postići visoku prostornu razlučivost. Sažeto rečeno, pasivni mikrovalni radiometri mogu imati potencijalnu uporabljivost kao senzori za sve vremenske prilike, no njihov potencijal kao pouzdanih uređaja za mjerenje debljine mrlje u ovom trenutku je neizvjestan.

Kapilarni valovi na moru reflektiraju energiju radara, dajući "svijetlo" more, odnosno svjetlu površinu na monitoru. Budući da nafta na površini mora stišava ("pegla") neke od kapilarnih valova, prisutnost naftne mrlje može se opaziti kao "tamno" more. Nažalost, naftne mrlje nisu jedina pojava koja se manifestira na ovaj način. Postoje mnoge interferencije i lažni ciljevi, uključujući mrlje slatke vode, mrlje od vjetra, sjene valova iza kopna ili struktura, koraljne nakupine koje smiruju vodu neposredno iznad njih, biogenetska ulja i sperma kitova i riba. Usprkos ovim ograničenjima, radar je važno oruđe za daljinsko otkrivanje jer je jedini senzor koji se može upotrijebiti za pretraživanje velikih područja i jedan od nekolicine koji mogu "vidjeti" noću i kroz oblake ili maglu.

### 3. IC kamere i otkrivanje onečišćenja mora naftom

Većina otkrivanja izljeva nafte u IC spektru odvija se u tzv. termičkom infracrvenom području, na valnim duljinama od 8 do 14  $\mu\text{m}$ . Pored već navedenog fizikalnog objašnjenja da naftna mrlja u tom dijelu IC zrači najviše energije razlog je i u utjecaju atmosfere na propagaciju IC zračenja [7]. Atmosfera atenuira izuzeto jako određena spektralna područja elektromagnetskog zračenja, dok neka druga atenuira slabo i ista se nazivaju "atmosferski prozori". Relativno složen utjecaj atmosfere na IC zračenje emitirano s površine mora ima za posljedicu potrebu korekcije registriranih podataka mjerenjem IC sustavom koji se koristi [8] ili mjerenjem određenih fizikalnih parametara atmosfere, te uporabom relevantnog programskog paketa (LOWTRAN i sl.). Tako u IC spektru postoje prozori za valne dužine od cca 3 do 5  $\mu\text{m}$  (tzv. SW kanal) i od cca 8 do 14  $\mu\text{m}$  (tzv. LW kanal).

Mjerenja vršena u spektralnom kanalu od 2.5 do 3.1  $\mu\text{m}$ , koristeći razliku u

refleksivnosti nafte i vode nisu dala zadovoljavajuće rezultate [9]. Također i ispitivanja srednje pojasnog IC sustava (3.4 do 5.4  $\mu\text{m}$ ) nad Tenyo Maru izljevom nafte u tom rasponu nisu pokazali da postoji nafta na moru, ali bili su vidljivi brodovi [10], [11]. Ispitivanja brojnih infracrvenih sustava pokazuju da je prostorna razlučivost iznimno važna kada je nafta raspoređeno u mrljama, emulzije nisu uvijek vidljive IC sustavima, i kamere koje rade u rasponu od 3 do 5  $\mu\text{m}$  samo su marginalno korisne [12], [13]. Istraživanja su pokazala da mjerni sustavi s više kanala [14] daju pouzdanije rezultate u otkrivanju termalnih zagađenja površine mora, u koja spada i zagađenje naftom.

Infracrvene kamere, odnosno termovizijski sustavi danas su vrlo česti u primjeni otkrivanja onečišćenja mora. U nedavnoj prošlosti uvelike su se koristili skeneri s infracrvenim detektorima, no nedostatak infracrvenih detektora je da zahtijevaju hlađenje kako bi se izbjeglo da termalni šum nadjača korisni signal. Uobičajeno se za hlađenje detektora koristio tekući dušik, koji omogućuje oko četiri sata rada. Novi, manji senzori koriste hlađenje zatvorenog ciklusa, Joule-Thompsonov tip uređaja za hlađenje, koji rade pomoću rashladnog učinka ekspanzije plina. Kako novi tip rashladnog uređaja koristi prenositi plinski cilindar ili kompresor to više ne postoji vremensko ograničenje u radu infracrvenog detektora. Mnogi novi infracrveni detektori ne zahtijevaju hlađenje što će implicirati daljnju siplifikaciju rada s infracrvenim sustavima za daljinsko otkrivanje.

No infracrveno otkrivanje nafte nije sigurno budući da se mogu umiješati nekoliko lažnih ciljeva, uključujući morską travu, druga termalna onečišćenja površine mora i dr. Ipak, infracrveno otkrivanje je relativno jeftino i trenutno je glavno oruđe za daljinsko otkrivanje izljeva nafte.

#### 4. Zaključak

Napredak u tehnologiji senzora nastavit će promicati korištenje daljinskih senzora kao operativna oruđa za otkrivanje izljeva nafte u budućnosti. Na tržištu se sada pojavljuju termalni infracrveni detektori koji nude visoku osjetljivost a bez potrebe za hlađenjem. Ovo poboljšanje ne samo da smanjuje veličinu i složenost senzora, već također i cijenu. U narednom desetljeću napredak u tehnologiji lasera uvelike će smanjiti veličinu i potrošnje energije laserskih daljinskih senzora. To će promovirati korištenje ovih senzora u manjim, ekonomičnijim zrakoplovima dostupnim mnogim službama i primorskim zemljama. Računalne sposobnosti koje se brzo poboljšavaju omogućit će procesiranje u stvarnom vremenu. Trenutno i u bliskoj budućnosti ne postoji jedan senzor koji će dati sve podatke potrebne za otkrivanje, klasifikaciju i kvantifikaciju nafte u pomorskom i obalnom okruženju.

Za sakupljanje, integriranje i interpretiranje nekoliko tipova podataka u stvarnom vremenu, na način koji će biti koristan interventnim ekipama na terenu, bit će potreban kombinirani napredak u tehnologiji senzora i računalnim sposobnostima. Ako se ovaj tip podataka bude mogao učiniti dostupnim interventnim ekipama u dovoljno kratkom vremenu nakon izljeva, to će se moći iskoristiti za smanjivanje potencijalno katastrofalnih učinaka velikog izljeva nafte i naftnih derivata na morski ekosustav.

Temeljem eksperimentalnih spoznaja može se ustvrditi da dvokanalna IC kamera (SW i LW kanal) omogućava otkrivanje broda na moru i praćenje termalnog traga broda (koji može biti detektabilan i po nekoliko sati, a u zavisnosti od stanja mora) kao i otkrivanje onečišćenja mora koje je taj brod uradio npr. ispiranjem spremnika. Integriranjem navedene dvokanalne IC kamere s kamerom u vidljivom dijelu spektra može se dobiti relativno jeftin i mobilni sustav koji bi imao veliku pouzdanost detektiranja navedenih onečišćenja.

U Republici Hrvatskoj bi se morao uložiti primjereni napor u operativno rješavanje problematike onečišćenja mora naftom. Projekt Ministarstva znanosti i tehnologije (1991. –

1993.) "Istraživanje zagađenja mora naftom aviotermalnim snimanjem" temeljio se je na teorijskom i eksperimentalnom znanju stručnjaka Brodarskog instituta i raspoloživoj IC mjernoj opremi, no nedostatak novčane potpore uzrok je prekida projekta. Očekivani porast prometa nafte Jadranom, a time i porast onečišćenja, te obveze vezane uz nadziranje mora dovoljni su čimbenici da se razmatrana problematika počne i rješavati.

## REFERENCES

- [1] Taylor, S. (1992). *0.45 to 1.1  $\mu\text{m}$  Spectra of Prudhoe Crude Oil and of Beach Materials in Prince William Sound, Alaska*, CRREL Special Report No. 92-5, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, 14 p.
- [2] Fingas, M.F., C.E. Brown and J.V. Mullin, (1998), "The Visibility Limits of Oil on Water and Remote Sensing Thickness Detection Limits", in *Proceedings of the Fifth Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, pp. II 411-418.
- [3] Bolus, R.L. (1996). "Airborne Testing of a Suite of Remote Sensors for Oil Spill Detecting on Water", in *Proceedings of the Second Thematic International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, pp. III 743-III 752.
- [4] Balick, L., DiBenedetto, J.A. and Lutz, S.S. (1997). "Fluorescence Emission Spectral Measurements for the Detection of Oil on Shore", in *Proceedings of the Fourth Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, Vol. I, pp. 13-20.
- [5] Brown, C.E., M.F. Fingas, R.H. Goodman, J.V. Mullin, M. Choquet and J-P. Monchalain, (2000) "Airborne Oil Slick Thickness Measurement", in *Proceedings of the Fifth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, pp. I219-224.
- [6] Dick, R., Fruhwirth, M. and Brown, C. (1992). "Laser Fluorosensor Work in Canada", in *Proceedings of the First Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, ERIM Conferences, Ann Arbor, Michigan, pp. 223-236.
- [7] Pašagić, V (1994): "Atmosferska propusnost infracrvenog zračenja u obalnom području", Zbornik radova 36. ELMAR-a, izdavač Branko Vidmar, 257-260.
- [8] Pašagić, V and Popović, M. (1993): "Method for determining the atmospheric correction of data measured over the sea by thermovision camera mounted on an aircraft", In. *J. Remote Sensing*, Vol. 14, No. 4, pp 723-728.
- [9] Seakem Oceanography, (1988). *Remote Sensing Chronic Oil Discharges*, Environment Canada Report EE-108, 46 p.
- [10] Rogne, T., Macdonald, I., Smith, A., Kennicutt, M.C. and Giammona, C. (1992). "Multi-spectral Remote Sensing and Truth Data from the TENYO MARU Oil Spill", in *Proceedings of the First Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, ERIM Conferences, Ann Arbor, Michigan, pp. 37-48, [Also published in *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 59, No. 3, pp. 391-397, 1993.]
- [11] Pašagić, V and Popović, M. (1993): "Design Guide for Suppressing Ship's Infrared Signature", *Brodogradnja*, 41, 177-181.
- [12] Hover, G.L. (1994). "Testing of Infrared Sensors for U.S. Coast Guard Oil Spill Response Applications", in *Proceedings of the Second Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments: Needs, Solutions and Applications*, ERIM Conferences, Ann Arbor, Michigan, pp. I-47-58.
- [13] Pašagić, V and Popović, M. (1993): "The influence of oil slicks on aviothermal pictures of the sea surface", *First Conference on Thermography*, Croatia, Zagreb, pp 174-177.
- [14] Pašagić, V i Popović, M. (1988): "Mjerni sistem za snimanje iz zraka u vidljivom i dva infracrvena spektralna područja", *Naučno-tehnički PREGLED*, 38, 24-27.