Dr Slavko Pokorni,
pukovnik, dipl. inž.
Vojna akademija VJ,
Beograd

PROBLEMI PRIMENE TERMOVIZIJE PRI MERENJU TEMPERATURNIH STANJA

UDC: 536.521:681.586.73

Rezime:

Instrumenti za snimanje temperaturnih stanja i merenje temperature primenom IC senzora (infracrveni termometri i termovizija) zasnivaju se na savremenoj tehnologiji. Iako njihovo korišćenje na prvi pogled izgleda jednostavno, primena zahteva poznavanje principa rada i mogućnosti instrumenata, kao i problema koji se istražuje. U ovom radu je data klasifikacija infracrvenih termografskih instrumenata, važna sa stanovišta praktične primene, naznačene su oblasti primene, analizirana razlika infracrvenih termografskih instrumenata za termičku vizuelizaciju objekata i merenje temperature, i analizirani problemi i osnovne greške pri njihovoj primeni. Takođe, dati su osnovni zahtevi za korisnike termovizije i praktične preporuke pri snimanju temperaturnog stanja i merenju temperature instrumentima na bazi infracrvenog zračenja.

Ključne reči: snimanje temperaturnog stanja, merenje temperature, infracrveni termometri, termovizija.

PROBLEMS IN THERMAL IMAGERY APPLICATION CONCERNING MEASUREMENTS OF TEMPERATURE STATES

Summary:

Instruments for recording temperature states and measuring temperature by IR sensors (infrared thermometers and thermal imagery) are based on state-of-the-art technologies. Although their use seem to be simple, their application requires a good knowledge of operation principles and possibilities of an instrument as well as of problems being investigated. In this article IR thermography devices are classified from the aspect of their application in practice, the fields of application are given and the difference between IR thermography devices for thermal visualization and temperature measurement is analyzed as well as problems and main errors in their application. Basic requirements for users of thermal imagery devices and some practical advice are given as well.

Key words: temperature state recording, temperature measurement in infrared thermometers, thermal imagery.

Uvod

Merenje temperature i snimanje temperaturnog stanja veoma je važno u tehnici, jer su osobine skoro svih materijala koji se koriste u elementima konstrukcija temperaturno zavisne. Pored toga, temperatura je često parametar nekog sistema na osnovu ko-

jeg se određuje ili reguliše veliki broj ostalih parametara. U vojsci, i drugim oblastima, važna je vizuelizacija objekata na osnovu njihovog temperaturnog stanja radi praćenja u uslovima slabe vidljivosti i otkrivanja maskiranih objekata.

Kontaktne metode merenja temperature (otporni termometri, termo-

parovi) imaju niz nedostataka, posebno kada se mere visoke temperature i kada je potrebno istovremeno izvršiti merenja u velikom broju tačaka. Nekonтактne metode, kao što je određivanje temperature primenom infracrvenog (IC) senzora, koje se zasnivaju na detekciji termalnog, odnosno IC zračenja površi objekta, nemaju tih nedostataka [1].

Danas postoje IC termografski sistemi (IC termometri, IC kamere) koji omogućavaju razlikovanje toplijih i hladnijih tačaka objekta (vizuelizacija objekta, snimanje temperaturnog stanja) merenje temperature čitave površi. Problem merenja temperature na osnovu IC zračenja razlikuje se od problema vizuelizacije objekata. Priroda i matematički model greške merenja temperature primenom IC senzora, odnosno IC kamere, analizirani su u [2, 3]. Međutim, i pri vizuelizaciji objekata (radi analize problema čiji ključ rešenja leži u temperaturnim fenomenima, ili radi otkrivanja maskiranih objekata) i pri merenju temperature javlja se niz praktičnih problema i grešaka koje često daju pogrešne rezultate, što dovodi u sumnju mogućnosti IC instrumenata. Ipak, uzrok je najčešće u neadekvatnoj i nestručnoj primeni instrumenta i nepravilnoj interpretaciji rezultata.

Klasifikacija IC termografskih instrumenata

Infracrveni termografski instrumenti mogu se klasifikovati na razne načine, a najznačajnija je klasifikacija sa stanovišta količine informacija koje oni daju. Postoje razne vrste IC instrumenata za snimanje temperaturnog stanja površi objekta, mada ne daju svi jednaku količinu informacije o temperaturi površi objekta. Zbog toga se prema obimu, odnosno dimenzionalnosti informacija o temperaturi, IC instrumenti svrstavaju u tri kategorije [4]:

1. IC instrumenti koji daju podatak o temperaturi jedne tačke na površi objekta, primajući zračenje sa jedne tačke objekta — IC termometri (engl. *pirometers, spot radiometers, thermopoint*);

2. IC instrumenti koji daju podatke o temperaturi jedne linije duž posmatranog objekta, odnosno profil temperature skaniranjem tačaka duž neke linije, a koji se nazivaju linijski radiometri (engl. *line radiometers, IR line scanners, thermoprofile*);

3. IC instrumenti koji daju podatke o temperaturama određenog dela površi objekta, odnosno termalnu mapu (sliku) ili raspodelu temperatura skanirajući određenu površ, a koji se nazivaju termovizija (engl. *imaging systems, IR scanners, thermovision*). Princip formiranja termalne slike kod termovizije prikazan je na slici 1.

Infracrveni termometri su najjeftiniji, ali daju i najmanje informacija o temperaturi površi objekta (temperaturu jedne tačke). Da bi se dobio podatak o temperaturi druge tačke potrebno je izvršiti novo merenje. Termovizijski sistemi su najskuplji, ali i, prostorno posmatrano, daju najviše informacija (istovremeno daju podatak o temperaturnom stanju velikog broja tačaka površi objekta). Koji će se od ovih instrumenata odabrati zavisi ne samo od raspoloživih materijalnih sredstava već i od konkretne namene, odnosno od vrste problema koji se rešava.

Najprivlačnija je termovizija koja omogućava trenutnu vizuelizaciju, pa i merenje temperature hiljade tačaka površi nekog objekta. Kao što televizija formira sliku objekta na osnovu vidljive svetlosti, tako termovizijski uređaj formira termalnu sliku (termogram) objekta na osnovu toplotnog, odnosno infracrvenog zračenja. Pored vrednosti temperature svake tačke, termovizija omogućava prikazivanje profila temperature duž željene linije, raspodelu temperature i praćenje di-

namike promene temperature u realnom vremenu. To je omogućeno povezivanjem personalnog računara (PC) u termovizijski sistem i odgovarajućim softverom [5, 6, 7]. Prvi termovizijski uređaj firme AGA (danas AGEMA) pojavio se sredinom šezdesetih godina. Počeci primene IC zračenja, za analizu

grafije, posebno termovizije moguća je i već dokazana u raznim oblastima, kao što su upravljanje procesima, kontrola i obezbeđenje kvaliteta, industrijska merenja, ispitivanje bez razaranja, dijagnostika, preventivno održavanje (mali broj otkaza uređaja nastaje a da nema prethodnih znakova da će do ot-

Sl. 1 — Princip formiranja slike termovizijske kamere

problema čiji je ključ rešenja u toplotnim fenomenima, zapisani su krupnim slovima u svetu nauke. Korporacija AGA je prva proizvela komercijalni termovizijski sistem povezan sa PC, i softver posebno razvijen za dijagnostiku termograma. Danas je to slučaj sa skoro svim proizvođačima termovizijske opreme. Funkcije takvog softvera mogle bi se grubo svrstati u četiri grupe [8]:

- kvantitativno merenje (proračun) stvarne temperature objekta;
- detaljna obrada i dijagnostika termograma;
- zapis, skladištenje i korištenje zapisanih termograma;
- upoređivanje termograma.

Oblasti primene IC termografskih instrumenata

Poslednjih dvadesetak godina IC termografija svakodnevno doživljava nove primene [6]. Primena IC termo-

kaza doći, a temperatura je često jedan od parametara koji na to ukazuje), itd. Infracrvena termografija ima sve veću primenu u oblasti istraživanja i razvoja, jer je danas jedan od osnovnih zahteva merenje i snimanje stacionarnih i dinamičkih temperaturnih stanja u realnom vremenu. Ona je efikasan, pouzdan i isplativ metod otkrivanja potencijalnih izvora otkaza električnih postrojenja i sprečavanja neplaniranih isključenja i opravki, kao i kontrole kvaliteta u industriji (naročito automobilske i poluprovodničke). Pored toga, pomoću IC termografije otkrivaju se gubici toplotne energije u zagrevanim objektima i sistemima za distribuciju medija za zagrevanje, istražuju termička stanja komponenti i sklopova energetske elektronike i rešavaju određeni problemi hlađenja, verifikacija teoretskih proračuna temperaturnih stanja, i mnoštvo drugih problema.

Od izuzetne važnosti je primena IC termovizije u vojsci — za otkrivanje maskiranih objekata, vizuelizaciju objekata u noćnim uslovima, snimanje signature aviona, u vazduhoplovnoj industriji za rešavanje raznih problema u vezi sa temperaturnim stanjem, itd. Razvoj tehnologije poluprovodničkih IC detektora omogućio je da IC sistemi za vizuelizaciju objekata budu lakši i manjih dimenzija i time pogodniji za ugradnju na izviđačke letelice i druge vojne sisteme. Važno je napomenuti da su IC sistemi za vizuelizaciju objekata pasivni sistemi, tj. snimaju sliku objekta na osnovu njegovog zračenja, i ne otkrivaju svoju poziciju, za razliku od, na primer, radarskih uređaja. Termovizija može kompenzirati nedostatke radarskih uređaja u otkrivanju niskoletućih ciljeva.

Termička vizuelizacija objekata i merenje temperature

Pojedini IC instrumenti u stanju su da detektuju temperaturne promene, a neki i da mere temperaturu. Zahtevi koji se postavljaju pred ove instrumente međusobno se razlikuju i nije moguće koristiti instrument namenjen za detekciju temperaturnih promena za merenje temperature, što nedovoljno upućeni često previđaju. Zbog ove bitne razlike IC termografski instrumenti, zavisno od namene, ocenjuju se i različitim pokazateljima.

Infracrvena termografija razvija se u dva pravca: jedan je dobijanje termalne slike, gde je potrebno samo utvrditi da li su dve susedne tačke međusobno toplije ili hladnije, a drugi je merenje (tačnije rečeno određivanje, proračun) temperature, gde je potrebno kvantitativno odrediti vrednost temperature.

Primer primene IC senzora za merenje temperature je razvoj instrumenta za direktno merenje temperature lopatica turbine turbomlaznog moto-

ra. Naime, klasičan sistem upravljanja turbomlaznim motorom zasniva se na merenju temperature izduvnih gasova nizom termoparova, koja je u vezi sa temperaturom lopatica turbine kao kritičnim parametrom rada turbomlaznog motora. Nedostatak ove tehnike je, pre svega, u algoritmu koji povezuje temperaturu izduvnih gasova sa temperaturom lopatica turbine, a čija razlika iznosi i do 40°C. Tako velika greška nameće potrebu da se smanji maksimalna dozvoljena temperatura lopatica turbine kako bi se obezbedila sigurnost da ne dođe do pregrevanja lopatica turbine, ali time se smanjuju i maksimalne performanse motora. Infracrvenim termometrima bi se omogućilo direktno merenje temperature lopatica turbine kao kritičnog parametra i time izbegla greška zbog algoritma koji povezuje ovu temperaturu sa temperaturom izduvnih gasova.

Razvoj IC senzora, digitalne i mikrop procesorske, odnosno računarske tehnike omogućio je da IC termografija izađe iz okvira detekcije toplo-hladno u oblast merenja temperatura i analize termičkih fenomena, tako da su savremeni IC termografski sistemi, u stvari, kombinacija sistema za merenje i sistema za analizu. No, bez obzira na savršenost računara, krajnji kvalitet informacije ipak je ograničen kvalitetom senzora i optičkog sistema, koji su prvi u lancu obrade informacije o temperaturi površi tela.

Savremeni termovizijski sistemi su modularne konstrukcije, što omogućava da se relativno jednostavno, polazeći od osnovne konfiguracije (kamera i pokazivačka jedinica), dodavanjem mikro ili personalnog računara, uređaja za video snimanje i štampanje, sistem dograđuje po potrebi, odnosno oformi fleksibilan sistem pogodan za primenu kao laboratorijska (stacionarna), pokretna ili prenosna konfiguracija (slika 2) [5].

U laboratorijskoj konfiguraciji sistem obuhvata IC kameru, upravljač-

ku i pokazivačku jedinicu, videorikorder, personalni računar i kolor štampač. U pokretnoj konfiguraciji obično obuhvata IC kameru, upravljačku i pokazivačku jedinicu, mikroračunar i videorikorder (ako je pokretna konfigu-

cioni termometri i termovizijske kamere ne pokazuju stvarnu već neku prividnu temperaturu, pa je jedan od ključnih problema radijacionih termometara kako odrediti stvarnu temperaturu tela. To znači da se do podata-

OBJEKTIVI

Sl. 2 — Blok-šema konfiguracije termovizijskog sistema

racija deo laboratorijske). Temperaturno stanje objekta može se direktno analizirati mikroračunarom, ili snimati na videotraku, a zatim u laboratoriji detaljno analizirati. Prenosna konfiguracija obuhvata IC kameru, upravljačku i pokazivačku jedinicu (mogu biti jedna celina) i mikroračunar. Predviđeno je da je korisnik nosi i na taj način koristi.

Indirektna i nekontaktna metoda merenja temperature i njene mogućnosti

Određivanje temperature površi materijala na osnovu merenja fluksa IC zračenja pripada grupi indirektnih metoda merenja temperature, pri čemu se koristi odgovarajući matematičko-fizički model za povezivanje temperature objekta sa direktno merenim veličinama u odgovarajućoj stvarnoj situaciji, odnosno, uslovima pri merenju fluksa zračenja. Zbog toga radija-

ka o temperaturi dolazi proračunom, a ne direktnim merenjem.

Određivanje temperature tela na osnovu posrednog merenja fluksa IC zračenja kompleksan je problem zbog uticaja više faktora kao što su: izvori zračenja (objekat, okolina, atmosfera), procesi (emisija, refleksija) na ukupno izmereni fluks, što otežava izdvajanje korisnog fluksa koji nosi informaciju o temperaturi površi objekta koja se određuje. Poseban uticaj ispoljava emisivnost objekta, koja je manja od jedinice i različita za različite materijale, pa je moguće da za dva različita materijala na istoj temperaturi termovizija pokazuje različite temperature. Problem pokušava da se reši i specijalnom konstrukcijom radijacionih termometara, što ne odgovara svim uslovima, posebno ne ako se merenje obavlja na objektu na terenu.

U mnogim primenama, i u vojsci, kao na primer pri otkrivanju maskiranih objekata, nije potrebno tačno iz-

meriti temperaturu neke tačke već je dovoljno samo utvrditi da li se temperature susednih tačaka na ispitivanoj površini razlikuju. Kod takvih primena nije od posebnog značaja što termovizija ne pokazuje prave vrednosti temperatura u pojedinim tačkama površi objekta. Međutim, ako je potrebno izmeriti stvarne vrednosti temperatura tačaka površi objekta, onda to postaje veoma važno i potrebno je rešiti znatno više problema da bi se došlo do stvarne temperature.

Jedan od značajnih problema primene IC senzora za merenje temperature jeste velika greška merenja, koja je posledica odabrane metode i instrumenta, kao i uslova i načina primene. Greška (ili tačnost) merenja koju navode proizvođači IC sistema odgovara situaciji koja se postiže pri kalibraciji uređaja pomoću crnog tela (emisivnost jednaka jedinici) u laboratorijskim uslovima. U neke IC termometre i kamere moguće je unositi podatke o emisivnosti materijala čija se temperatura meri i tako koriguje temperatura koju ona pokazuje, a neki IC sistemi imaju softver koji omogućava da se unesu i druge direktno merene veličine. Problem određivanja greške merenja temperature IC kamerom, matematički model greške i analiza određenih faktora može se videti u [1, 2]. Merenje temperature površi materijala objekta na niskim temperaturama ili temperaturama bliskim temperaturi okoline (ambijenta) najveći je izazov u IC termometriji, jer je IC signal veoma mali (blizak nuli) kada su temperature samog instrumenta i temperature objekta bliske ili jednake.

Međutim, bez obzira na to da li se radi o termičkoj vizuelizaciji objekta ili merenju temperature, javlja se niz praktičnih problema i grešaka koje često dovode do pogrešnih rezultata, pa se sumnja u mogućnosti IC instrumenata.

Praktični problemi primene termovizije

Prvi kontakt sa termovizijom fascinira termogramima, koji prikazuju raspodelu temperature na površi nekog objekta, pri čemu je određenoj temperaturi (opsegu temperatura) dodeljena određena boja (ili nivo sivog, ako se radi o crnobelom termogramu), u skladu sa ukupnim opsegom temperatura na objektu i brojem boja i nijansi. Danas broj boja doseže 256 i više. Međutim, detaljniji uvid u rezultate ili upoređenje sa rezultatima dobijenim nekom komparativnom metodom može pokazati da se rezultati dobijeni termovizijom mogu veoma razlikovati od stvarnih temperatura na objektu koji se snima. To se veoma lako može uočiti ako se, na primer, snima lice čoveka, kada se lako primećuje da se temperatura koju pokazuje termovizija razlikuje od stvarne temperature, koja je u ovom slučaju dosta dobro poznata. Međutim, najčešće temperature koje se žele izmeriti nisu ni približno poznate, pa se takvi pogrešni rezultati (ako se ne koristi i neka komparativna metoda) ne mogu uočiti, i prihvataju se kao tačni, što može imati višestruke negativne posledice. Takvi rezultati često mogu da obeshrabre korisnike termovizije i navedu ga da posumnja u njene mogućnosti.

Osnovne greške pri primeni termovizije

Loši rezultati dobijeni primenom termovizije (rezultati ispod njenih stvarnih mogućnosti), bez obzira na to da li se radi o detekciji temperaturnih razlika ili o merenju temperature, najčešće nastaju greškom korisnika, dakle ljudskog faktora. Smatra se da do uzroka loših rezultata [10, 11] dolazi kada:

— operator, odnosno lice koje koristi termoviziju, ne poznaje i ne ra-

zume naučnu osnovu IC zračenja i IC termografije;

— operator ne poznaje dobro problem koji istražuje;

— operator pokušava da dođe do podataka (rezultata) koristeći opremu koja nije namenjena za dobijanje takvih podataka;

— operator uopšte ne razume problem, odnosno ne shvata do kakvih podataka treba da dođe;

— instrument je loše kalibrisan ili je istekao rok kalibracije.

To može dovesti do niza nekorisnih, pa i štetnih rezultata u izveštaju o istraživanju, kao što su [10]: netačni podaci, nerazumljivi podaci za korisnika ili samo deo podataka, pri čemu nedostaju bitni parametri.

Iskustva iz primene termovizije pokazuju da greške često dovode do toga da se za netačne i neupotrebljive rezultate okrivljuje instrument, odnosno najčešće tvrdi da je instrument neispravan.

Osnovni zahtevi za korisnike termovizije

Osnovni zahtevi koji se postavljaju pred korisnike termovizije za istraživanje i rešavanje problema, u bilo kojoj oblasti, jesu [10]:

— poznavanje fizičke osnove IC zračenja;

— poznavanje instrumenta i problema koji se rešava;

— odgovarajuće iskustvo u primeni termovizije u oblasti koja se istražuje;

— korišćenje instrumenta koji može dati željene podatke.

Osnovni zahtevi u pripremi za istraživanje primenom termovizije su [12]:

— kalibrisan instrument;

— dobro analizirana i definisana okolina objekta (izvori zračenja u okolini objekta) koji se istražuje;

— analiziran materijal površi objekta i okarakterisan podacima, odnosno emisivnošću;

— analizirani dosadašnji rezultati istraživanja problema koji se želi rešiti, ili sličnog problema.

Podaci o objektu, okolini i medijumu prostiranja IC zračenja moraju se uneti u odgovarajući fizičko-matematički model za proračun temperature. Takav matematički model, čija složenost, odnosno usklađenost sa stvarnom fizičkom situacijom utiče na tačnost proračunate vrednosti temperature, obično je »ugrađen« u instrument, a potrebni podaci se unose preko odgovarajuće komande ili tastature ako je sistem povezan sa računarom. Tačnost rezultata zavisi od tačnosti modela, kao i od tačnosti unetih podataka.

Praktične preporuke za korišćenje termovizije

Očigledno da, osim prethodne analize objekta koji se istražuje, postoje tri ključna problema:

— priprema termovizijskog, odnosno IC instrumenta;

— korišćenje instrumenta,

— interpretacija dobijenih rezultata.

Prema tome, potrebno je razviti standarde za kalibraciju termovizije, odnosno IC instrumenata, standarde za njihovo korišćenje i standarde za analizu rezultata koji se njima dobijaju. S obzirom na to da je i kod nas primena termovizije sve veća, ovi problemi postaju sve aktuelniji i moraju se rešavati na profesionalnom nivou.

Pri merenju temperature na osnovu IC zračenja [14] mogu se formulisati sledeće mere i praktične preporuke

koje treba preduzeti, odnosno imati u vidu:

- meriti na objektima koji su tamne boje u vidljivom opsegu;

- približiti senzor (kameru) što više objektu, kako bi zauzeo što više vidnog polja, odnosno ekrana na displeju pokazivačke jedinice, odnosno instrumenta, i fokusirati;

- merenje vršiti vertikalno u odnosu na površ objekta koji se snima (čija se temperatura meri);

- pomerati kameru radi uočavanja uticaja refleksija od objekata iz okoline;

- nije bitan materijal objekta, već površ objekta;

- meriti (snimati), po mogućnosti, u uslovima bez vetra;

- što je viša temperatura objekta u odnosu na okolinu, manja će biti greška merenja;

- izbegavati sunce, svetlost, spektralnu apsorpciju i zračenje.

Zaključak

Infracrveni termografski sistemi imaju veoma široku primenu u industriji, medicini, vojsci, i drugim specifičnim delatnostima. Instrumenti se

zasnivaju na savremenoj tehnologiji, a njihova upotreba je jednostavna, pa i nedovoljno osposobljen korisnik može dobiti određene rezultate, koji na žalost mogu biti pogrešni ili pogrešno interpretirani. Zbog nedovoljnog poznavanja mogućnosti instrumenta i problema koji se rešava postoji opasnost da rezultati budu predstavljeni kao ispravni, jer njihova neispravnost nije očigledna.

Zbog toga korisnik IC termografskih instrumenata, odnosno termovizije, mora veoma dobro da poznaje principe na kojima oni rade, teorijske osnove IC zračenja, kao i fizičke osnove problema koji se istražuje, kao što su karakteristike zračenja objekta (posebno emisivnost materijala, a ako se radi o propusnim materijalima onda su potrebni i drugi podaci), uslovi razmene temperature sa okolinom, karakteristike okoline, itd. Jedino na taj način mogu se postići rezultati koji imaju upotrebnu vrednost i profesionalni nivo.

Radi obezbeđenja profesionalnog nivoa primene termovizije potrebno je razviti standarde za kalibraciju IC instrumenata, standarde za njihovo korišćenje, i standarde za analizu rezultata.

Literatura:

- [1] Kriksunov, L. Z.: Spravočnik po osnovam infrakrasnoj tehnici, Sovetskoe radio, Moskva, 1978.
- [2] Pokorni, S.: Analiza greške određivanja temperature površi materijala primenom IC senzora, ETRAN'96, Zbornik radova, sveska IV, Budva, 4—7. juni 1996, str. 103—106.
- [3] Pokorni, S.: Analiza greške određivanja temperature površi čvrstih materijala IC kamerom, Vojnotehnički glasnik, 1/98, str. 75—86.
- [4] Madding, R.: Thermographic Instruments and Systems, University of Wisconsin — Extension, Department of Engineering and Applied Science, 1979.
- [5] Thermovision 870, Operating Manual, AGEMA Infrared Systems, 1991.
- [6] Fifth Biennial Infrared Information Exchange, Proceedings, book I, II, New Orleans, Louisiana, October 29—31, 1985. (IRIE '85).
- [7] Ravich, E. L.: Thermal Imaging: A Review, Laser Focus/Electro-Optics, pp 98—110, february 1986.
- [8] Kaplan, H.: Infrared Thermal Imaging Diagnostics — The New Software, Laser Focus/Electro-Optics, pp 150—157, novembar 1987.
- [9] David, C. Evans: »Positive identification using infrared facial imager«, Defense & Security ELECTRONICS, Electronic Technologies And Applications For Government And Industry, Atlanta, USA, str. 24—25, Vol. 28, No. 3, mart 1986.
- [10] Baird, G. S.: Questions of quality in thermographic services, Thermosense VIII, SPIE, Vol. 581, 1986.
- [11] Roberts, C. C., Roberts, C.: The misuse of infrared thermography, Thermosense VIII, SPIE, Vol. 581, 1986.
- [12] Courville, G. E.: Current status of professionalism in commercial infrared sensing, An International Conference on Thermal Infrared Sensing for Diagnostics and Control (Thermosense VIII), September 17—20, 1985, Cambridge, Massachusetts, SPIE, Vol. 581, 1986.
- [13] Morrill, R. E. K.: The technologist as an expert witness, Thermosense VII, SPIE, vol. 520, p. 11—16, 1984.
- [14] Hughes Corp.: Probeye, Application Manual.