

CONTRIBUȚII LA CONCEPȚIA UNUI SISTEM ÎMBCAT PE AUTOMOBILE PENTRU PROTECȚIA PIETONILOR

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Electronică și Telecomunicații

autor ing. Teodor-Cosmin Dehelean

conducător științific Prof. univ .dr. ing. Corina Naforniță

Iulie 2021

Teza prezintă metode analitice noi pentru evaluarea gradului de performanță a algoritmilor de urmărire a țintelor multiple din traficul rutier și rezultate experimentale care demonstrează utilitatea practică a metodelor propuse. Metodele pot fi folosite în diverse aplicații tehnice, în special în funcțiile de urmărire și protecție a pietonilor, care au de regulă un model dinamic cu un număr relativ mare ($L > 4$) de puncte reprezentative.

Evoluția tehnologică a sistemelor radar de detecție și urmărire a țintelor aflate în zona de acoperire permite în prezent o reprezentare detaliată a obiectelor de interes. Spre deosebire de primele generații de radare automotive, în care fiecare obiect detectat era reprezentat în modelul intern de percepție printr-un singur punct caracteristic, radarele moderne pot estima nu doar centrul de masă al fiecărei ținte, ci și distribuția exactă a acesteia în spațiu. Date suplimentare cum ar fi lățimea, lungimea, conturul sau orientarea unghiulară corespunzătoare unui autoturism sau pieton pot fi colectate cu o precizie dependentă de condițiile de mediu și de parametrii tehnici de operare ai radarului, cum ar fi de exemplu temperatura internă a acestuia sau tensiunea de alimentare a interfeței analogice de radio-frecvență. Reprezentarea extinsă a țintelor multiple conduce la probleme noi în evaluarea nivelului de performanță a sistemelor de tracking. Atât starea reală în spațiul multidimensional corespunzătoare unui obiect, cât și starea estimată sunt reprezentate printr-un număr ridicat de puncte caracteristice, comparația între percepție și realitate devenind astfel mai dificilă.

Algoritmii de urmărire concomitentă a unui număr mare de obiecte de interes sunt folosiți frecvent în diferite domenii științifice sau tehnice, cum ar fi biologia moleculară, sisteme de transport, în aplicații militare sau în robotică. Pentru senzorii îmbarcați pe autoturisme, funcția centrală a acestora constă în detecția categoriilor diferite de ținte, de exemplu autoturisme, pietoni sau bicicliști, având la intrare o mulțime de semnale perturbate de zgomot și interferențe. Pe durata prezenței acestor ținte în câmpul de acoperire al sensorului, traiectoriile corespunzătoare fiecărei ținte sunt urmărite iterativ, de la momentul intrării acestora în zona de acoperire până la dispariția lor.

Luând în considerare proprietățile particulare ale modelelor de mișcare pentru fiecare categorie de ținte, metodele aplicate pentru detecție și urmărire variază și permit diferențierea între categorii, de exemplu între autoturisme și participanți vulnerabili la trafic. Ca urmare a îmbunătățirii remarcabile obținută în ultimii ani în ceea ce privește rezoluția de localizare a radarelor automotive, reprezentarea

obiectelor urmărite a devenit mai exactă dar și mai complexă, dat fiind faptul că fiecărei ținte îi sunt atribuite mai multe puncte caracteristice, aflate de regulă la extremitățile sale geometrice. Setul de puncte reprezentative este monitorizat pe întreaga perioadă de observație.

Pentru a elimina dezavantajele legate de problema de asociere între observațiile prelevate la un moment dat și obiectele reale, Mahler a introdus un model matematic nou, utilizat între timp din ce în ce mai des în algoritmi de tracking automotive. Acesta are la bază reprezentarea stărilor reale și a celor estimate sub forma unor mulțimi de date aleatoare (RFS). Modelul aplică un principiu similar cu cel al filtrelor Bayes sau Kalman, compus din două etape iterative, prima de predicție și a doua de corecție. Spre deosebire de filtrul Kalman, acest model propagă între iterații funcția de intensitate statistică a-posteriori a RFS, respectiv momentul statistic de ordin întâi al RFS, numit și densitatea de probabilitate a ipotezelor (PHD).

Capitolul 1

Acest capitol este o introducere în principiul de funcționare a sistemelor radar imbarcate pe autoturisme. Inițial sunt prezentate atât tipurile diferite de senzori utilizați de regulă în mașini, cât și avantajele și dezavantajele relative între sistemele radar, lidar și camere video. În continuare, sunt enumerate categoriile diferite de radare automotive și câteva funcții uzuale ale acestora. Nu doar capacitatea remarcabilă de percepție a radarelor de ultimă generație ci și raportul preț / performanță deosebit de atractiv poziționează tehnologia radar în fruntea echipamentelor necesare pentru evoluția graduală spre nivelul maxim L5 de autonomie automotive, atunci când mașinile pot naviga complet autonom, fără intervenția vreunui conducător auto.

Capitolul 2

O primă *contribuție personală* este dată de prezentarea în Capitolul 2 a principiului de funcționare și ale bazelor teoretice ale unui radar automotive, autorul studiind atât vasta literatură de specialitate menționată în bibliografie, cât și utilizând experiența personală acumulată într-un proiect de dezvoltare în cadrul companiei Continental. Sunt discutate categoriile de radare rezultate în funcție de raza de acoperire și unghiul de apertură. Principiul Doppler de măsură permite determinarea vitezei radiale relative între o țintă urmărită și ego-vehicul, respectiv automobilul pe care este imbarcat radarul de referință. În plus, un radar permite determinarea distanței dintre poziția sa de referință și fiecare țintă în parte și a orientării unghiulare corespunzătoare fiecărei ținte.

Principiul de procesare numerică a semnalului FMCW recepționat este prezentat în detaliu, evidențiindu-se necesitatea de a efectua un număr relativ mare de transformate Fourier rapide (FFT). Acest lucru implică acceleratoare hardware specializate în calculul FFT, integrate în procesorul numeric de semnal radar. În continuare sunt prezentate cerințele relevante pentru dimensionarea memoriei de date a procesorului, pentru a putea stoca cubul de date radar.

Protecția participanților vulnerabili la trafic, de exemplu a pietonilor sau a bicicliștilor, are o importanță deosebită. Pentru detecția pietonilor, se urmărește identificarea amprentelor biometrice cauzate de bătăile inimii sau de micro-mișcări ale brațelor și picioarelor. Principiul Doppler utilizat pentru ținte de dimensiuni relativ mari, de exemplu mașini sau camioane, nu mai poate fi aplicat cu succes în acest caz. Prin utilizarea efectului micro-Doppler descris în acest capitol este posibilă detecția și localizarea pietonilor, bicicliștilor sau chiar a unor animale care traversează șoseaua.

Capitolul 3

În cadrul unei noi *contribuții personale* din capitolul 3, sunt prezentate și apreciate critic tehnicile de procesare digitală a semnalelor radar. Semnalul de recepție conține informații utile atât în amplitudine, cât și în fază și trebuie considerat în lanțul de procesare ca și un semnal complex. Sunt descrise componentele hardware și software utilizate în procesarea semnalelor radar. Una din etapele finale a lanțului de procesare este cea de urmărire în timp a țintelor de interes. Algoritmi de tracking utilizați în mod frecvent până în prezent necesită o asociere a detecțiilor prelevate la fiecare ciclu radar unor obiecte considerate ca fiind existente și menținute în memoria procesorului într-o listă dinamică de

ținte ipotetice. Etapa de asociere este una în care se pierde o parte din informația disponibilă la receptor și care de multe ori induce erori suplimentare. Pentru a evita acest dezavantaj, teza propune utilizarea unei familii noi de algoritmi de tracking și anume filtrele cu propagare a momentului statistic de ordin întâi al densității de probabilitate, PHD. Aceste filtre consideră toate țintele detectate la un moment dat ca fiind o singură multi-țintă cu caracteristici statistice corespunzătoare.

După prima respectiv a doua transformare FFT, se obțin valorile pentru distanță și viteză relativă. Stabilirea poziției unghiulare necesită prelucrarea simultană a ecoului radar prelevat de către mai multe antene de recepție, poziționate la multipli întregi ai jumătății lungimii de undă a semnalului purtător. Pentru îmbunătățirea rezoluției unghiulare și în consecință a separabilității între obiecte învecinate, se pot cascada mai multe interfețe analogice de radio-frecvență, obținându-se astfel un număr mai mare de canale de recepție.

Limita de detecție a țăintelor permite separarea semnalului util de zgomot și semnale perturbatoare. Pentru a eficientiza consumul de resurse hardware necesare pentru etapa de detecție, această limită CFAR trebuie adaptată dinamic în funcție de forma semnalelor recepționate și de numărul de ținte.

O mare parte a eșantioanelor semnalului de la receptor sunt sub limita de detecție și pot fi eliminate din etapele ulterioare de procesare. Stabilirea suportului sparse a acestor semnale, deci a regiunilor de frecvență în care este concentrată energia utilă a semnalului, are o importanță centrală în compresia datelor. Arhitecturile noi ale rețelelor electronice din autoturisme consideră centralizarea procesării semnalelor radar provenite de la mai mulți senzori. Astfel, senzorii din generațiile următoare vor transmite semnale puțin procesate (post conversie analog-digitală, eventual după prima transformare FFT) pe magistrale de date de viteză înaltă, de exemplu 1Gbit Ethernet. Metodele de compressive sensing analizate ca și *contribuție personală* în această teză permit reducerea considerabilă a volumului de date utile, fără pierderi semnificative de informație. Modelele matematice și rezultatele experimentale corespunzătoare sunt prezentate și discutate în detaliu în acest capitol.

Capitolul 4

Capitolul 4 se concentrează pe algoritmi uzuali de urmărire a țăintelor. Modelele de observație, respectiv de mișcare a țăintelor, sunt analizate în detaliu, stabilind astfel baza teoretică pentru rezultatele experimentale prezentate în capitolul 5. Filtrele Kalman și Kalman extins sunt prezentate succint, fiind considerate cunoscute și având un număr remarcabil de publicații descriptive.

Modelarea matematică a obiectelor cu reprezentare extinsă este discutată ca și *contribuție personală* la finalul acestui capitol.

Capitolul 5

Capitolul 5 este dedicat metodelor de evaluare a gradului de performanță a algoritmilor de urmărire a țăintelor multiple. Și în acest capitol, *contribuția personală* începe prin clasificarea și aprecierea critică a metricilor uzuale, folosite în prezent pentru validarea algoritmilor de tracking. Setul de metrici CLEAR este relativ simplu și poate fi calculat cu efort computațional redus. Dezavantajele principale ale acestuia constau în capacitatea slabă de identificare a confuziilor și în invarianța acurateței de localizare relativ la durata intervalului de timp în care persistă aceste confuzii. Metrica OSPA combină valorile pentru acuratețe și precizie din setul CLEAR și elimină dezavantajele de mai sus legate de situațiile cu confuzii.

Această teza propune ca și o nouă *contribuție personală* utilizarea distanței Mahalanobis ca și distanță de bază în calculul OSPA. Distanța Mahalanobis permite integrarea gradului de incertitudine în evaluarea performanței algoritmilor de tracking. Astfel, prin utilizarea distanței M-OSPA se pot distinge diferențele de performanță între algoritmi cu valori medii identice pentru distanță, viteză relativă și poziție unghiulară, dar cu parametri statistici diferiți. Următoarea *contribuție personală*, prezentată de asemenea în acest capitol, introduce o metodă eficientă de calcul al valorii M-OSPA pentru scenarii cu ținte multiple care au fiecare o reprezentare extinsă, deci cu mai multe puncte caracteristice per țintă. Metoda introdusă permite o reducere a timpului de procesare cu aproximativ 20%.

Variantele majore ale algoritmilor de tracking PHD sunt prezentate în detaliu. În plus este discutat și ulterior utilizat în partea de simulări filtrul multi-Bernoulli cu cardinalitate echilibrată pentru multi-ținte, CB-MB. Avantajele și limitările fiecărui filtru sunt discutate în subcapitolele corespunzătoare.

Ultima *contribuție personală* este dată de un set amplu de simulări și rezultate experimentale. Acesta demonstrează că metrica M-OSPA cu factor de formă poate fi folosită cu succes remarcabil și într-un mod eficient pentru a identifica cel mai performant tracker de multi – obiecte dintr-un set dat de algoritmi.

Capitolul 6

Capitolul 6 conține concluziile tezei de doctorat. El rezumă capitolele anterioare și subliniază contribuțiile personale aduse de autor în această lucrare.

Referințe bibliografice selectate

- [1] Aspencore, Sensors in automotive, J. Joshida, Ed., Cambridge: Aspencore LLD, 2020.
- [2] S. Patole, M. Torlak, D. Wang și M. Ali, „Automotive Radars: A review of signal processing techniques,” *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 22-35, March 2017.
- [3] M. A. Richards, J. A. Scheer și W. A. Holm, Principles of Modern Radar, Raleigh: Scitech Publishing, 2010.
- [4] V. C. Chen, The Micro-Doppler Effect in Radar, Artech House, 2011.
- [5] J. Cooley și J. Tukey, „An Algorithm for the Machine Computation of Complex Fourier Series,” *Mathematics of Computation*, vol. 19, p. 297–301, 1965.
- [6] N. Levanon, Radar Principles, New York: John Wiley and Sons, 1988.
- [7] H. Finn și R. Johnson, „Adaptive Detection Mode with Threshold Control as a Function of Spatially Sampled Clutter-Level Estimates,” *RCA Review*, vol. September, p. 414–464, 1968.
- [8] S. Kay, Fundamentals for Statistical Signal Processing, vol. 1: Estimation Theory, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- [9] H. Rohling, „New CFAR-Processor Based on an Ordered Statistic,” în *Proceedings of the IEEE International Radar Conference*, Arlington, 1985.
- [10] A. Macaveiu, A. Campeanu și I. Nafornta, „Kalman-Based Tracker for Multiple Radar Targets,” 2014.
- [11] C. Nafornta, A. Isar și T. Dehelean, „Comparison of Two Compressive Sensing Algorithms for Automotive Radar,” în *International Symposium on Electronics and Telecommunications*, Timisoara, 2020.
- [12] M. Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, New York: McGraw-Hill, 2005.
- [13] X. R. Li și V. Jilkov, „Survey of maneuvering target tracking: Part I. Dynamic models,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic*, p. 1333–1364, October 2003.
- [14] R. A. Howard, „System analysis of semi-Markov processes,” *IEEE Transactions Military Electronics, MIL-8*, p. 114–124, 1964.
- [15] F. Gustafsson, F. Gunnarsson, N. Bergman, U. Forssell și e. al., „Particle Filters for Positioning, Navigation and Tracking,” *IEEE Transactions on Signal Processing, Special Issue on Monte Carlo Methods for Statistical Signal Processing*, vol. 50, nr. 2, pp. 425 - 437, 2002.
- [16] K. Granstrom, M. Baum și S. Reuter, „Extended Object Tracking: Introduction, Overview and Applications,” *Journal of Advances in Information Fusion*, vol. 12, no. 2, pp. 139-174, Dezember 2017.
- [17] T. Dehelean, C. Nafornta și A. Isar, „Enhanced metric for multiple extended object tracker,” *Revue Roumaine des Sciences Techniques - Serie Électrotechnique et Énergétique*, vol. 65, nr. 3-4, pp. 235 - 243, 2020.
- [18] T. Dehelean, C. Nafornta și A. Isar, „Estimate’s Statistics in the Performance Evaluation of Extended Object Tracker,” în *2019 International Symposium on Signals, Circuits & Systems (ISSCS)*, Iasi, 2019.
- [19] T. Dehelean, C. Nafornta și A. Isar, „OSPA Metric for Radar Extended Object Tracker,” în *2018 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, Timisoara, 2018.
- [20] T. D. Vu, „Vehicle Perception: Localization, Mapping with Detection, Classification and Tracking of Moving Objects,” Institut National Polytechnique, Grenoble, 2009.
- [21] K. Bernardin și R. Stiefelhagen, „Evaluating Multiple Object Tracking Performance: The CLEAR MOT Metrics,” *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, pp. 1-10, 2008.

- [22] J. R. Hoffman și R. P. S. Mahler, „Multitarget miss distance via optimal assignment,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 34, no. 3, pp. 327-336, May 2004.
- [23] D. Schuhmacher, B. T. Vo și B. N. Vo, „A Consistent Metric for Performance Evaluation of Multi-Object Filters,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 56, no. 8, pp. 3447-3457, 2008.
- [24] B. Ristic, B. N. Vo, D. Clark și B. T. Vo, „A Metric for Performance Evaluation of Multi-Target Tracking Algorithms,” *IEEE TRANS. SIGNAL PROCESSING, VOL. 59, NO. 7*, pp. 3452-3457, 2011.
- [25] P. Mather și B. Tso, *Classification Methods for Remotely Sensed Data, Second Edition. Environmental engineering.*: Taylor & Francis, 2009.
- [26] B. T. Vo, „Matlab toolbox for Random Finite Set,” 2019. [Interactiv]. Available: <http://ba-tuong.vo-au.com/codes.html>.
- [27] B. N. Vo și W. K. Ma, „The Gaussian mixture probability hypothesis density filter,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 54, no. 11, p. 4091–4104, 11 2006.
- [28] B. Ristic, B. T. Vo, B. N. Vo și A. Farina, „A Tutorial on Bernoulli Filters: Theory, Implementation and Applications,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 61, nr. 13, pp. 3406 - 3430, 2013.
- [29] B. T. Vo, B. N. Vo și A. Cantoni, „Analytic Implementations of the Cardinalized Probability Hypothesis Density Filter,” *Signal Processing, IEEE Transactions on*. 55, p. 3553 – 3567, 2007.
- [30] B. Vo, S. Singh și A. Doucet, „Sequential Monte Carlo methods for multi-target filtering with random finite sets,” *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 41, nr. 4, p. 1224–1245, 2005.