

SYSTÈME KHÉOPS v2.9

Système de Poursuite Acoustique de Drones

Documentation Technique Complète

Conforme ISO 9613-2 / Cramer (1993)

Version 2.9 - Propagation Acoustique

Table des Matières

1. Introduction

Le système Khéops v2.9 est un simulateur avancé de poursuite de drones basé sur la localisation acoustique. Il implémente un réseau de 5 microphones en configuration tétraédrique pour estimer la position 3D d'un drone en temps réel via l'analyse des différences de temps d'arrivée (TDOA - Time Difference Of Arrival) des signaux sonores.

Cette version intègre un modèle complet de propagation acoustique conforme à la norme ISO 9613-1, ainsi qu'un système de perturbation par le vent qui simule les conditions réelles d'utilisation sur le terrain.

1.1 Objectifs du Système

- Localisation 3D passive de drones par triangulation acoustique
- Estimation robuste de position malgré les perturbations environnementales
- Handover automatique vers un système de conduite de tir
- Simulation réaliste incluant vent, température, humidité et pression

2. Architecture Générale

2.1 Composants Principaux

Le système est organisé en modules fonctionnels interconnectés :

Module	Description
Cramer / ISO 9613-2	Calcul de la vitesse du son selon température, humidité, pression et CO ₂
Modèle de Vent	Simulation réaliste du vent avec profil logarithmique et rafales
Moteur TDOA	Calcul des différences de temps d'arrivée entre capteurs
Algorithme de Chan	Résolution analytique directe pour localisation 3D
Cohérence Géométrique	Analyse statistique de 210 solutions pour robustesse
Modèle Acoustique	Calcul du SNR et de la bulle de détection dynamique
Conduite de Tir	Gestion du handover et tracking caméra automatique

2.2 Configuration des Capteurs

Le réseau utilise 5 microphones disposés en configuration tétraédrique asymétrique :

1. S₀ : Position (-0.5, -0.5, 0.0) m - Coin arrière gauche
2. S₁ : Position (+0.5, -0.5, 0.0) m - Coin arrière droit
3. S₂ : Position (+0.5, +0.5, 0.0) m - Coin avant droit
4. S₃ : Position (-0.5, +0.5, 0.0) m - Coin avant gauche
5. S₄ : Position (0.0, 0.0, 0.636) m - Sommet central (capteur zénithal)

Cette géométrie permet une résolution optimale en élévation grâce au capteur central surélevé.

3. Calcul de la Vitesse du Son (Cramer 1993 / ISO 9613-2)

Le calcul précis de la vitesse du son dans l'air humide repose sur les travaux de Cramer (1993) publiés dans le Journal of the Acoustical Society of America, complétés par les méthodes d'atténuation de la norme ISO 9613-2 pour la propagation en extérieur.

3.1 Formule Fondamentale

La vitesse du son est calculée par la relation thermodynamique :

$$c = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T / M}$$

Où :

- γ = rapport des chaleurs spécifiques C_p/C_v du mélange gazeux
- $R = 8.314462 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ - Constante universelle des gaz parfaits
- T = température absolue en Kelvin
- M = masse molaire du mélange air humide en kg/mol

3.2 Pression de Vapeur Saturante

Calculée selon l'équation de Magnus-Tetens améliorée (formule de Sonntag 1990), recommandée par l'OMM avec une précision de $\pm 0.01\%$ pour -45°C à $+60^\circ\text{C}$:

$$\ln(psat) = -6096.9385/T + 16.635794 - 0.02711193 \cdot T + 1.673952 \times 10^{-5} \cdot T^2 + 2.433502 \cdot \ln(T)$$

3.3 Facteur d'Augmentation

Le facteur d'augmentation (enhancement factor) corrige l'écart à l'idéalité du mélange air-vapeur d'eau, selon la formule de Greenspan (1976) simplifiée :

$$f = 1.00062 + 3.14 \times 10^{-8} \cdot p + 5.6 \times 10^{-7} \cdot t^2$$

Où t est la température en $^\circ\text{C}$ et p la pression en Pa.

3.4 Composition du Mélange Gazeux

La fraction molaire de vapeur d'eau est :

$$x_w = (hr/100) \cdot f \cdot psat / p$$

La masse molaire du mélange est calculée par :

$$M = (1 - x_w - x_{CO_2}) \cdot M_{air} + x_w \cdot M_{H_2O} + x_{CO_2} \cdot M_{CO_2}$$

Avec les constantes :

- $M_{air} = 0.0289652 \text{ kg/mol}$ (air sec)
- $M_{H_2O} = 0.01801528 \text{ kg/mol}$ (vapeur d'eau)
- $M_{CO_2} = 0.04401 \text{ kg/mol}$ (dioxyde de carbone)

3.5 Rapport des Chaleurs Spécifiques

Le rapport γ du mélange est calculé par moyenne pondérée des capacités calorifiques :

$$\gamma = Cp_{\text{mix}} / Cv_{\text{mix}} = (Cv_{\text{mix}} + R) / Cv_{\text{mix}}$$

Avec les valeurs de référence :

- $\gamma_{\text{air_sec}} = 1.4$ (diatomique)
- $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 1.33$ (triatomique)
- $\gamma_{\text{CO}_2} = 1.30$ (triatomique)

3.6 Validation Croisée ISO 9613-2

Le système implémente deux méthodes de calcul parallèles pour validation croisée. La formule polynomiale complète de Cramer (1993) intègre explicitement la fraction molaire de CO₂, permettant une précision accrue dans les environnements à concentration variable :

$$c = a_0 + a_1t + a_2t^2 + (a_3 + a_4t + a_5t^2)xw + (a_6 + a_7t + a_8t^2)p + \dots$$

L'écart entre les méthodes thermodynamique et polynomiale est affiché dans l'interface pour validation continue (<0.1% attendu).

4. Modèle de Vent (ISO 9613-2)

Le vent est modélisé conformément à la correction météorologique C_0 de la norme ISO 9613-2. Il agit comme perturbateur inconnu du système d'estimation, corrompant les TDOA de manière asymétrique en modifiant la vitesse effective de propagation du son selon la direction.

4.1 Profil Vertical (Loi de Prandtl)

Le vent suit un profil logarithmique dans la couche limite atmosphérique :

$$v(z) = v_{\text{ref}} \times \ln(z/z_0) / \ln(z_{\text{ref}}/z_0)$$

Paramètres du modèle :

- $z_{\text{ref}} = 10 \text{ m}$ - Hauteur de référence pour les mesures météo
- $z_0 = 0.1 \text{ m}$ - Rugosité de surface (terrain plat)
- $v_{\text{ref}} = \text{vitesse configurée par l'utilisateur (10-70 km/h)}$

4.2 Dynamique des Rafales

Le système simule des rafales réalistes avec :

- Probabilité de déclenchement : 2% par frame
- Durée : 1 à 4 secondes
- Facteur multiplicatif : $1.3 \times$ à $1.6 \times$ la vitesse de base
- Variation de direction : $\pm 15^\circ$ pendant la rafale

4.3 Dérive de Direction

La direction du vent dérive lentement au cours du temps :

- Nouvelle direction cible toutes les 60 secondes
- Variation maximale : $\pm 30^\circ$ autour de la direction de base
- Interpolation exponentielle douce (facteur 0.01/s)

4.4 Impact sur la Propagation (ISO 9613-2 §C₀)

Conformément à l'annexe C de la norme ISO 9613-2, le vent modifie la vitesse effective du son selon la direction de propagation :

$$c_{\text{eff}} = c + V_{\text{vent}} \cdot \cos(\theta)$$

Où θ est l'angle entre la direction du vent et la direction source-récepteur. Cette modification asymétrique corrompt les TDOA et dégrade la précision de localisation.

5. Algorithme de Localisation TDOA

5.1 Principe des TDOA

La localisation repose sur les différences de temps d'arrivée (TDOA) entre paires de capteurs. Pour 5 capteurs, on obtient $C(5,2) = 10$ paires TDOA.

Chaque TDOA définit une surface hyperboloïde de révolution dont les foyers sont les deux capteurs considérés. L'intersection de ces hyperboloides donne la position de la source.

5.2 Méthode de Chan

L'algorithme de Chan (Y.T. Chan, 1994) fournit une solution analytique directe au problème de localisation TDOA, évitant les itérations numériques coûteuses.

5.2.1 Construction du Système

On définit les distances différentielles par rapport au capteur S_0 :

$$d_{i0} = c \times (\text{TOA}_i - \text{TOA}_0) = R_i - R_0$$

Le système linéaire 4×4 est construit comme suit pour $i \in \{1,2,3,4\}$:

$$\mathbf{A} \cdot [x, y, z, R_0]^T = \mathbf{B}$$

Avec :

- $\mathbf{A}[i] = [x_i - x_0, y_i - y_0, z_i - z_0, d_{i0}]$
- $B[i] = 0.5 \times (|S_i|^2 - |S_0|^2 - d_{i0}^2)$

5.2.2 Résolution par Gauss-Jordan

Le système est résolu par élimination de Gauss avec pivot partiel :

1. Recherche du pivot maximum dans la colonne
2. Permutation des lignes si nécessaire
3. Élimination vers l'avant (triangularisation)
4. Substitution arrière pour obtenir $[x, y, z, R_0]$

6. Analyse de Cohérence Géométrique

Le module de cohérence analyse la dispersion des solutions pour détecter et filtrer les perturbations (vent, bruit).

6.1 Génération des Solutions Candidates

À partir des 10 paires TDOA, le système génère $C(10,4) = 210$ combinaisons de 4 paires. Chaque combinaison permet de résoudre un système surdéterminé par moindres carrés.

6.2 Filtrage des Solutions

Les solutions sont filtrées selon des critères physiques :

- Distance < 500 m (bulle de détection)
- Altitude entre -10 m et 200 m
- Absence de valeurs NaN ou infinies

6.3 Calcul du Centroïde Robuste

Le centroïde est calculé par la médiane (et non la moyenne) pour résister aux outliers :

$$\text{Centroïde} = (\text{median}(X), \text{median}(Y), \text{median}(Z))$$

6.4 Indice de Cohérence

La dispersion est l'écart-type 3D des solutions par rapport au centroïde. L'indice de cohérence décroît exponentiellement avec la dispersion :

$$\text{Cohérence} = 100 \times \exp(-\text{dispersion} / \text{seuil})$$

Interprétation :

- > 70% : Conditions stables, haute confiance
- 40-70% : Perturbations modérées
- < 40% : Conditions dégradées, utiliser le centroïde

6.5 Ellipse de Confiance

Une ellipse de confiance 2σ est calculée par analyse en composantes principales (ACP) :

- Calcul de la matrice de covariance 2D
- Extraction des valeurs propres (rayons)
- Calcul de l'angle principal par $\arctan(2 \cdot \text{cov}_{xy} / (\text{var}_x - \text{var}_y))$

6.6 Fusion Chan-Cohérence

La position finale combine la solution de Chan et le centroïde robuste :

$$\text{Position} = w \cdot \text{Chan} + (1-w) \cdot \text{Centroïde}, \text{ où } w = \text{Cohérence}/100$$

Cette fusion permet d'exploiter la précision de Chan en conditions normales tout en basculant automatiquement vers l'estimation robuste en cas de perturbations.

7. Modèle Acoustique (ISO 9613-2)

7.1 Niveau Sonore Reçu (Adiv)

Le niveau sonore reçu suit la loi d'atténuation par divergence géométrique Adiv définie dans ISO 9613-2 :

$$L_p(r) = LW - Adiv - Aatm + Cmet$$

Où selon ISO 9613-2 :

- $Adiv = 20 \cdot \log_{10}(r) + 11$ dB - Divergence géométrique
- $Aatm = \alpha \cdot r / 1000$ dB - Absorption atmosphérique (réf. ISO 9613-1)
- $Cmet$ = Correction météorologique vent (± 4 à ± 5 dB/100m)

7.2 Types de Drones

Type	Masse	SPL @ 1m
Mini	250 g	74 dB
Consumer	600 g	79 dB
Prosumer	1.2 kg	83 dB
Pro	3 kg	87 dB
Lourd	5 kg	90 dB
FPV Racing	~300 g	95 dB

7.3 Types de Terrain

Terrain	Bruit de Fond
Eau / Lac	25 dB
Forêt	30 dB
Campagne	35 dB
Périurbain	45 dB
Urbain	55 dB
Industriel	60 dB

7.4 Calcul du SNR

Le rapport signal/bruit détermine la détectabilité :

$$SNR = Niveau_reçu - Bruit_fond$$

Seuils de détection :

- $SNR \geq 3$ dB : Détection possible
- $SNR \geq 15$ dB : Signal clair
- $SNR < 3$ dB : Signal perdu

7.5 Bulle de Détection Dynamique (Cmet)

La portée de détection varie selon la direction conformément à la correction météorologique Cmet de ISO 9613-2 :

- Vent favorable (drone → capteur) : atténuation réduite de -4 dB/100m
- Vent contraire : atténuation accrue de +5 dB/100m

La bulle devient donc asymétrique, plus étendue dans la direction d'où vient le vent.

8. Système de Conduite de Tir

8.1 Handover Acoustique → Caméra

Le transfert de piste vers la caméra est déclenché quand la distance estimée passe sous le seuil de handover (configurable, défaut 35 m). Le système passe alors en mode slow-motion (0.3x) pour faciliter le tracking.

8.2 Tracking Caméra

La caméra effectue un tracking en deux phases :

- Phase guidage : Suit la position estimée (guidage Khéops)
- Phase contact visuel : Une fois le drone dans le FOV ($\pm 30^\circ$), track direct sur position réelle

8.3 Critères de Lock-On

- Target Centered : Erreur angulaire $< 3^\circ$
- Lock-On : Erreur angulaire $< 1.5^\circ$
- Tir autorisé : Lock-On + Distance $<$ Handover + Cooldown respecté (0.3s)

8.4 Simulation de Tir

Le tir simule un effet shotgun avec une zone d'effet configurable (défaut 5 m). Le drone est neutralisé si l'erreur de visée est inférieure au spread.

9. Modèle de Comportement du Drone

9.1 Profil FPV Agressif

Le drone simulé adopte un comportement de type FPV racing avec des manœuvres imprévisibles :

- Accélération maximale : 2g (~20 m/s²)
- Probabilité de manœuvre : 50% par seconde
- Durée des manœuvres : 0.5 à 2 secondes
- Vitesse nominale : 12 m/s (configurable)
- Vitesse max : 150% de la nominale en pointe

9.2 Contraintes de Vol

- Altitude : 15 m à 80 m (rebond aux limites)
- Rayon de bulle : 150 m (force de rappel au-delà de 60%)
- Spawn : 95% du rayon de bulle avec trajectoire vers le centre

10. Interface Utilisateur

10.1 Vues Disponibles

- Vue Carte : Position GPS sur fond OpenStreetMap avec traces et bulle de détection
- Vue Latérale : Profil altitude avec drone et estimation
- Vue Caméra : Simulation de la caméra de tracking
- Vue Réticule : Viseur avec lock-on et indicateurs de tir

10.2 Panneaux de Contrôle

- Conduite de Tir : État du handover, mode, status fire/no-go
- Doppler : Vitesse radiale, intégration, vitesse du son
- ISO 9613-1 : Diagnostics du calcul de vitesse du son
- Vent : Vitesse, direction, rose des vents, alertes rafales
- Cohérence : Indice, dispersion, nombre de solutions valides
- Acoustique : SNR, niveau reçu, bruit de fond, portée max
- Précision : Erreurs 3D, distance, pourcentage

10.3 Paramètres Configurables

Paramètre	Plage	Défaut
Distance Handover	10 - 80 m	35 m
Vitesse Drone	5 - 25 m/s	12 m/s
Spread Shotgun	1 - 15 m	5 m
Délai Respawn	0.5 - 5 s	2 s
Température	-20 à +50 °C	20 °C
Humidité	0 - 100 %	50 %
Pression	900 - 1100 hPa	1013 hPa
CO ₂	300 - 600 ppm	400 ppm
Vitesse Vent	10 - 70 km/h	20 km/h
Direction Vent	0 - 360°	45°

11. Glossaire

Terme	Définition
TDOA	Time Difference Of Arrival - Différence de temps d'arrivée entre deux capteurs
TOA	Time Of Arrival - Temps d'arrivée absolu du signal
SNR	Signal-to-Noise Ratio - Rapport signal sur bruit en décibels
SPL	Sound Pressure Level - Niveau de pression acoustique
FOV	Field Of View - Champ de vision de la caméra
Handover	Transfert de piste d'un système à un autre
Lock-On	Accrochage de la cible - la caméra suit précisément le drone
ISO 9613-2	Norme internationale pour le calcul de l'atténuation acoustique en extérieur
Cohérence	Mesure de la dispersion des solutions de localisation
FPV	First Person View - Vol en immersion

12. Références Normatives et Scientifiques

Normes ISO :

- ISO 9613-2:2024 - Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: Engineering method
- ISO 9613-1:1993 - Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Atmospheric absorption

Publications Scientifiques :

- O. Cramer (1993) - "The variation of the specific heat ratio and speed of sound in air with temperature, humidity, and CO₂ concentration" - J. Acoust. Soc. Am. 93(5)
- Y.T. Chan & K.C. Ho (1994) - "A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location" - IEEE Trans. Signal Processing
- D. Sonntag (1990) - "Important new values of the physical constants" - Meteorologische Zeitschrift
- L. Greenspan (1976) - "Functional equations for the enhancement factors" - J. Research NBS 80A
- L. Prandtl (1925) - "Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz" - ZAMM