ДӘРІС №9. Тақырыбы: Координаттар мен объектілердің жылдамдығын анықтау дәлдігі.

Дәрістің мақсаты: студенттерге спутниктік навигация жүйелері арқылы объектілердің координаттары мен жылдамдығын анықтау принциптерін түсіндіру, позициялау және жылдамдықты анықтау дәлдігі ұғымдарын қалыптастыру, навигациялық өлшеулердің негізгі қателік көздерін және олардың дәлдікке әсерін қарастыру.
Дәріс жоспары:

1. Спутниктік навигация және координаттарды анықтау міндеті
2. GNSS арқылы объект координаттарын анықтау принципі
3. Координаттарды анықтау қателігі және дәлдік көрсеткіштері
4. Спутниктердің геометриялық орналасуы және DOP көрсеткіштері
5. Навигациялық өлшеулердегі негізгі қателік көздері.
6. Объектінің жылдамдығын анықтау әдістері
7. Доплер эффектісі арқылы жылдамдықты анықтау
8. Жылдамдықты анықтау дәлдігі және оны бағалау
9. Координаттар мен жылдамдықтарды анықтау дәлдігін арттыру әдістері
10. GNSS және INS жүйелерін біріктіру
11. Навигациялық дәлдікті эксперименттік бағалау
12. Қорытынды

1. Кіріспе

Қазіргі кезде спутниктік навигациялық жүйелер көлік, авиация, теңіз навигациясы, геодезия, ауыл шаруашылығы, ғарыш техникасы және басқа да көптеген салаларда кеңінен қолданылады. Спутниктік навигацияның негізгі міндеттерінің бірі – объектінің Жер бетіндегі немесе кеңістіктегі координаттарын, қозғалыс бағытын және жылдамдығын анықтау. Жаһандық навигациялық спутниктік жүйелерге GPS, ГЛОНАСС, Galileo және BeiDou жүйелері жатады. Бұл жүйелердің барлығы навигациялық сигналдарды тарататын жасанды Жер серіктерінің топтамасынан және жердегі басқару инфрақұрылымынан тұрады. Навигациялық қабылдағыш бірнеше спутниктен келетін сигналдарды қабылдайды. Сигналдардың таралу уақыты, фазасы және жиілігі туралы ақпараттарды өңдеу нәтижесінде пайдаланушының координаттары мен қозғалыс параметрлері анықталады. Алайда навигациялық қабылдағыш анықтаған координаттар мен жылдамдықтар абсолютті дәл болмайды. Нақты нәтиже әртүрлі қателіктердің әсерінен өзгереді. Сондықтан спутниктік навигацияда координаттар мен жылдамдықтарды анықтау дәлдігін бағалау маңызды ғылыми және инженерлік міндет болып табылады.

2. Координаттарды спутниктік әдіспен анықтау

GNSS жүйесінде қабылдағыштың координаттарын анықтау үшін бірнеше спутниктің сигналдары пайдаланылады.

Қарапайым жағдайда спутник пен қабылдағыш арасындағы геометриялық қашықтық мына формуламен анықталады:

$$\rho_i = \sqrt{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]} \quad (1)$$

Мұндағы:

- ρ_i – қабылдағыш пен i-спутник арасындағы қашықтық;
- x, y, z – қабылдағыштың координаттары;
- x_i, y_i, z_i – i-спутниктің координаттары.

Нақты навигациялық өлшеулерде қабылдағыш геометриялық қашықтықты емес, псевдоқашықтықты өлшейді. Псевдоқашықтықтың құрамында спутник пен қабылдағыш сағаттарының қателері, атмосфералық кідірістер және өлшеу шуылы болады. Жалпы түрде псевдоқашықтықты былай көрсетуге болады:

$$P_i = \rho_i + c(\delta t_u - \delta t_i) + I_i + T_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

Мұндағы:

- P_i – өлшенген псевдоқашықтық;
- c – жарық жылдамдығы;
- δt_u – пайдаланушы қабылдағышының сағат қатесі;
- δt_i – спутник сағатының қатесі;
- I_i – ионосфералық кідіріс;
- T_i – тропосфералық кідіріс;
- ε_i – өлшеудің кездейсоқ қатесі.

Бірнеше спутниктен алынған осындай теңдеулер жүйесін шешу арқылы қабылдағыштың координаттары анықталады.

3. Координаттарды анықтау қатесі

Координаттарды анықтау дәлдігін бағалау үшін анықталған координаттар нақты немесе эталондық координаттармен салыстырылады.

Нақты координаттарды:

$$X_0 = (x_0, y_0, z_0)$$

деп, ал өлшенген координаттарды:

$$X = (x, y, z)$$

деп белгілейік.

Жеке координаталар бойынша қателер:

$$\Delta x = x - x_0 \quad (3)$$

$$\Delta y = y - y_0 \quad (4)$$

$$\Delta z = z - z_0 \quad (5)$$

Үш өлшемді кеңістіктегі жалпы позициялық қате:

$$\Delta R = \sqrt{[(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2]} \quad (6)$$

Бұл формула объектінің нақты орны мен навигациялық қабылдағыш анықтаған орны арасындағы кеңістіктік айырмашылықты көрсетеді.

Көлденең позициялау қатесін де жеке бағалауға болады:

$$\Delta R_2^D = \sqrt{[(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2]} \quad (7),$$ Ал биіктікті анықтау қатесі: $\Delta h = h - h_0$ (8)

түрінде есептеледі.

Мұндағы h – қабылдағыш анықтаған биіктік, ал h_0 – эталондық биіктік.

4. Спутниктердің орналасуының дәлдікке әсері

Координаттарды анықтау дәлдігіне әсер ететін негізгі факторлардың бірі – навигациялық спутниктердің кеңістікте орналасуы. Егер бірнеше спутник аспанның бір ғана бөлігінде орналасса, координаттарды анықтау геометриясы қолайсыз болады. Мұндай жағдайда өлшеу қателері координаттарды анықтау нәтижесіне көбірек әсер етеді. Егер спутниктер аспан күмбезінде кеңінен және біркелкі орналасса, координаттарды анықтау дәлдігі жоғарылайды. Спутниктік геометрияны бағалау үшін DOP – «Dilution of Precision» көрсеткіштері қолданылады.

Негізгі DOP көрсеткіштері:

- GDOP – жалпы геометриялық дәлдік факторы;
- PDOP – позицияны анықтау дәлдік факторы;
- HDOP – көлденең дәлдік факторы;
- VDOP – вертикаль дәлдік факторы;
- TDOP – уақытты анықтау дәлдік факторы.

Жалпы жағдайда позициялау қателігін жуықтап былай бағалауға болады:

$\boldsymbol{\sigma_p \approx PDOP \cdot \sigma_{uere}}$ (9) Мұндағы σ_p – позициялау қатесінің стандарттық ауытқуы, ал σ_{uere} – пайдаланушыға қатысты эквивалентті қашықтық қатесінің стандарттық ауытқуы. DOP мәні неғұрлым аз болса, спутниктердің геометриялық орналасуы соғұрлым қолайлы болады.

5. Координаттарды анықтау дәлдігіне әсер ететін негізгі факторлар

5.1. Ионосфераның әсері

Навигациялық сигнал спутниктен қабылдағышқа дейін таралу кезінде Жердің ионосфералық қабатынан өтеді. Ионосфера сигналдың таралу жылдамдығына әсер етіп, қосымша кідіріс тудырады.

Ионосфералық қателіктің шамасы сигналдың жиілігіне, Күн белсенділігіне, тәулік уақытына және спутниктің көкжиек үстіндегі орналасуына тәуелді.

Екі жиілікті навигациялық қабылдағыштарды пайдалану ионосфералық қатені азайтуға мүмкіндік береді.

5.2. Тропосфераның әсері

Тропосфералық әсер атмосфераның төменгі қабаттарында пайда болады. Сигналдың таралуына ауа температурасы, қысым және ылғалдылық әсер етеді. Спутник көкжиекке жақын орналасқан жағдайда тропосфералық әсердің салыстырмалы ықпалы артады.

5.3. Көпсәулелі таралу

Ғимараттар, жер беті және басқа кедергілер спутниктік сигналдарды шағылыстыруы мүмкін. Нәтижесінде қабылдағышқа бір сигналдың бірнеше көшірмесі әртүрлі жолдармен келеді.

Бұл құбылыс көпсәулелі таралу немесе multipath деп аталады.

Көпсәулелі таралу координаттарды анықтау кезінде қосымша қате туғызады. Сондықтан жоғары дәлдікті навигациялық жүйелерде антеннаның орналасуына және техникалық сипаттамаларына ерекше көңіл бөлінеді.

5.4. Қабылдағыштың техникалық қателері

Қабылдағыштың электрондық компоненттеріндегі шу, генератордың тұрақсыздығы, сигналды өңдеу алгоритмдері және антеннаның сипаттамалары да навигациялық дәлдікке әсер етеді.

6. Объектінің жылдамдығын анықтау

Спутниктік навигацияның тағы бір маңызды міндеті – қозғалыстағы объектінің жылдамдығын анықтау. Жылдамдықты анықтаудың қарапайым әдісі – объект координаттарының уақыт бойынша өзгерісін пайдалану.

Егер объектінің t_1 уақытындағы координаты X_1, ал t_2 уақытындағы координаты X_2 болса, орташа жылдамдық:

$$\mathbf{V = (X_2 - X_1) / (t_2 - t_1)} \quad (10)$$

формуласы бойынша анықталады.

Бұл әдіс қарапайым болғанымен, координаттардағы қателер жылдамдықты анықтау нәтижесіне тікелей әсер етеді.

Мысалы, координаттарда кездейсоқ шу болса, екі уақыт мезетіндегі координаттардың айырмасын есептеу кезінде бұл қателер жылдамдық бағасына өтеді. Сондықтан GNSS жүйелерінде жылдамдықты анықтау үшін спутниктік сигналдың Доплерлік ығысуын пайдалану кең таралған.

7. Доплер эффектісі арқылы жылдамдықты анықтау

Қабылдағыш пен спутник бір-біріне қатысты қозғалған кезде қабылданатын сигналдың жиілігі өзгереді. Бұл құбылыс Доплер эффектісі деп аталады.

Доплерлік жиіліктің ығысуы:

$$\mathbf{f_D = -(v_r / c) \cdot f_0} \quad (11)$$

формуласымен сипатталады.

Мұндағы:

- f_D – Доплерлік жиілік ығысуы;
- v_r – спутник пен қабылдағыш арасындағы радиалды салыстырмалы жылдамдық;
- c – жарық жылдамдығы;
- f_0 – сигналдың тасымалдаушы жиілігі.

Осыдан радиалды жылдамдық:

$$\mathbf{v_r = -(c \cdot f_D) / f_0} \quad (12)$$

формуласы бойынша анықталады.

Бірнеше спутниктің Доплерлік өлшеулерін бірге өңдеу арқылы объектінің үш өлшемді жылдамдығын анықтауға болады.

Доплерлік әдістің маңызды артықшылығы – жылдамдықты координаталардың уақыт бойынша өзгерісін есептеу арқылы емес, сигнал жиілігінің өзгеруі негізінде анықтауға мүмкіндік беруі.

8. Жылдамдықты анықтау дәлдігі

Жылдамдықты анықтау дәлдігіне келесі факторлар әсер етеді:

- спутниктердің орналасу геометриясы;
- сигналдың шу деңгейі;

- қабылдағыштың жиілікті өлшеу дәлдігі;
- генератордың тұрақтылығы;
- көпсәулелі таралу;
- атмосфералық әсерлер;
- Доплерлік жиілікті есептеу алгоритмі.

Өлшенген жылдамдық пен нақты жылдамдық арасындағы қате:

$$\Delta V = V_{meas} - V_{true} \quad (13)$$

түрінде анықталады.

Көптеген өлшеулер нәтижесінде орташа квадраттық қатені немесе RMSE көрсеткішін пайдалануға болады:

$$RMSE_v = \sqrt{[(1/N) \cdot \Sigma(V_i - \hat{V}_i)^2]} \quad (14)$$

Мұндағы:

- N – өлшеулер саны;
- V_i – нақты жылдамдық;
- $\hat{V}_i$ – өлшенген жылдамдық.

RMSE мәні неғұрлым аз болса, жылдамдықты анықтау дәлдігі соғұрлым жоғары болады.

9. Навигациялық дәлдікті арттыру әдістері

Координаттар мен жылдамдықтарды анықтау дәлдігін арттыру үшін бірнеше технология қолданылады.

9.1. Бірнеше GNSS жүйесін бірге пайдалану

GPS, ГЛОНАСС, Galileo және BeiDou жүйелерінің сигналдарын бір қабылдағышта пайдалану көрінетін спутниктердің санын көбейтеді.

Бұл спутниктердің геометриялық орналасуын жақсартуға және DOP мәндерін төмендетуге мүмкіндік береді.

9.2. Дифференциалдық навигация

Дифференциалдық GNSS әдісінде координаттары алдын ала белгілі базалық станция қолданылады. Базалық станция мен пайдаланушы қабылдағышына ортақ қателер бағаланып, пайдаланушыға түзетулер беріледі.

Бұл әдіс автономды навигациямен салыстырғанда координаттарды анықтау дәлдігін едәуір арттыра алады.

9.3. Тасымалдаушы фазаны пайдалану

Жоғары дәлдікті навигацияда сигналдың тасымалдаушы фазасын өлшеу қолданылады.

Фазалық өлшеулерді өңдеу арқылы өте жоғары позициялау дәлдігіне қол жеткізуге болады. Бірақ бұл әдіс күрделі алгоритмдерді және қосымша есептеулерді қажет етеді.

9.4. GNSS және INS жүйелерін біріктіру

GNSS пен инерциялық навигациялық жүйені (INS) біріктіру де навигациялық жүйенің сенімділігі мен дәлдігін арттырады.

GNSS жүйесі абсолюттік координаттар туралы ақпарат береді, ал INS акселерометрлер мен гироскоптардың көмегімен объектінің қозғалысын үздіксіз бағалайды.

Бұл әдіс спутниктік сигнал уақытша жоғалған жағдайда ерекше пайдалы.

10. Координаттар мен жылдамдық дәлдігін эксперименттік бағалау

Координаттар мен жылдамдықты анықтау дәлдігін тәжірибе жүзінде бағалау үшін келесі жұмыс алгоритмін қолдануға болады:

1. GNSS қабылдағышынан координаттар мен жылдамдық туралы мәліметтер жинау.
2. Эталондық координаттарды анықтау.
3. Өлшенген және эталондық координаттарды салыстыру.
4. Δx, Δy және Δz қателерін есептеу.
5. Кеңістіктік позициялау қатесін анықтау.
6. Спутниктердің санын және DOP көрсеткіштерін тіркеу.
7. Объектінің жылдамдығын анықтау.
8. Өлшенген жылдамдықты эталондық жылдамдықпен салыстыру.
9. Жылдамдық қатесін және RMSE мәнін есептеу.
10. Нәтижелерді графиктер мен кестелер түрінде көрсету.

Мысалы, бірнеше өлшеу нәтижесі бойынша орташа позициялық қатені:

$$\Delta\bar{R} = (1/N) \cdot \Sigma\Delta R_i \quad (15)$$

формуласы арқылы есептеуге болады. Ал өлшеу нәтижелерінің стандарттық ауытқуы:

$$\sigma = \sqrt{[\Sigma(x_i - \bar{x})^2 / (N - 1)]} \quad (16)$$

формуласы арқылы анықталады. Осы көрсеткіштер навигациялық жүйенің тұрақтылығы мен дәлдігін сандық түрде бағалауға мүмкіндік береді.

11. Қорытынды

Координаттар мен объектілердің жылдамдығын анықтау дәлдігі спутниктік навигация жүйесінің маңызды техникалық сипаттамаларының бірі болып табылады.

Координаттарды анықтау дәлдігіне спутниктердің геометриялық орналасуы, ионосфералық және тропосфералық әсерлер, көпсәулелі таралу, қабылдағыштың техникалық сипаттамалары және өлшеу алгоритмдері әсер етеді.

Спутниктердің геометриялық орналасуын бағалау үшін DOP көрсеткіштері қолданылады. PDOP, HDOP және VDOP мәндері неғұрлым төмен болған сайын, навигациялық өлшеулер үшін геометриялық жағдай соғұрлым қолайлы болады.

Объектінің жылдамдығын координаталардың уақыт бойынша өзгеруі немесе спутниктік сигналдың Доплерлік ығысуы арқылы анықтауға болады. Доплерлік әдіс қозғалыстағы объектінің жылдамдығын анықтауда маңызды орын алады.

Навигациялық дәлдікті арттыру үшін бірнеше GNSS жүйесін бір уақытта пайдалану, дифференциалдық түзетулерді қолдану, тасымалдаушы фазаны өңдеу және GNSS/INS интеграциясы сияқты заманауи әдістер қолданылады.

Осылайша, спутниктік навигация жүйесінің сапасын бағалау кезінде координаттар мен жылдамдықтардың абсолюттік қателерімен қатар спутниктік геометрияны, өлшеу тұрақтылығын және жүйеге әсер ететін сыртқы факторларды кешенді түрде қарастыру қажет.

Бақылау сұрақтары

1. Спутниктік навигация жүйесінің негізгі міндеттері қандай?
2. GNSS жүйесінде объектінің координаттары қалай анықталады?
3. Псевдоқашықтық дегеніміз не?
4. Псевдоқашықтықты өлшеуге қандай факторлар әсер етеді?
5. Координаттарды анықтау қатесі дегеніміз не?
6. Объектінің кеңістіктік позициялау қатесі қалай есептеледі?
7. Көлденең және вертикаль позициялау қателерінің айырмашылығы неде?
8. DOP көрсеткіші нені сипаттайды?
9. PDOP, HDOP және VDOP көрсеткіштерінің айырмашылығы қандай?
10. Спутниктердің геометриялық орналасуы навигация дәлдігіне қалай әсер етеді?
11. Ионосфералық қате қалай пайда болады?
12. Тропосфералық қате дегеніміз не?
13. Көпсәулелі таралу құбылысы дегеніміз не және ол навигация дәлдігіне қалай әсер етеді?
14. Қабылдағыштың техникалық сипаттамалары координаттарды анықтау дәлдігіне қалай әсер етеді?
15. Объектінің жылдамдығын координаттардың өзгеруі арқылы қалай анықтауға болады?
16. Доплер эффектісі дегеніміз не?
17. Доплерлік ығысу мен объектінің радиалды жылдамдығы арасында қандай байланыс бар?
18. Доплер әдісі арқылы объектінің жылдамдығы қалай анықталады?
19. Жылдамдықты анықтау қатесі қалай есептеледі?
20. RMSE көрсеткіші нені сипаттайды?
21. Координаттар мен жылдамдықтарды анықтау дәлдігін арттырудың қандай әдістері бар?
22. Дифференциалдық GNSS технологиясының артықшылығы неде?
23. Тасымалдаушы фазаны пайдалану навигация дәлдігін қалай арттырады?
24. GNSS пен INS жүйелерін біріктірудің қандай артықшылықтары бар?
25. Навигациялық жүйенің дәлдігін тәжірибелік жолмен қалай бағалауға болады?