ДӘРІС №10. Тақырыбы: Дифференциалдық жер серіктік навигациялық жүйелер және дәлдікті арттыру технологиялары.

Дәрістің мақсаты: Студенттерге дифференциалдық жер серіктік навигациялық жүйелердің жұмыс істеу принциптерін түсіндіру, навигациялық өлшеулердің дәлдігін арттыру әдістерін меңгерту және DGPS, DGNSS, RTK, SBAS сияқты технологиялардың ерекшеліктерін қарастыру.
Дәріс жоспары:

1. Дифференциалдық спутниктік навигация туралы жалпы түсінік
2. Дифференциалдық GNSS жүйесінің құрылымы
3. Базалық станцияның қызметі
4. Дифференциалдық түзетулерді қалыптастыру және пайдалану
5. Дифференциалдық навигацияның дәлдікті арттыру принципі
6. DGPS технологиясы
7. DGNSS технологиясы
8. RTK технологиясы
9. RTK жүйесіндегі тасымалдаушы фазаны өлшеу
10. RTK Fixed және Float режимдері
11. SBAS – спутниктік навигацияны кеңейту жүйелері
12. Көпжүйелі және көпжиілікті GNSS технологиялары
13. GNSS және INS жүйелерін интеграциялау
14. Дифференциалдық навигация дәлдігіне әсер ететін факторлар
15. Навигациялық дәлдікті бағалау әдістері
16. Дифференциалдық GNSS технологияларының қолданылу салалары
17. Қорытынды

1. Кіріспе

Жер серіктік навигациялық жүйелер қазіргі заманғы көлік, авиация, теңіз навигациясы, геодезия, картография, ауыл шаруашылығы, құрылыс және ғарыш техникасында кеңінен қолданылады. GPS, ГЛОНАСС, Galileo және BeiDou сияқты жаһандық навигациялық спутниктік жүйелер объектінің координаттарын, қозғалыс бағытын және жылдамдығын анықтауға мүмкіндік береді. Алайда кәдімгі автономды GNSS қабылдағышының дәлдігі әртүрлі сыртқы және ішкі факторларға байланысты шектеледі. Оларға спутниктік сигналдың атмосфера арқылы таралуы, спутник сағатының қателігі, эфемеридтік қателер, қабылдағыштың сағат қателігі, көпсәулелі таралу және өлшеу шуылы жатады. Жоғары дәлдікті навигация қажет болған жағдайда қарапайым автономды GNSS режимінің мүмкіндіктері жеткіліксіз болуы мүмкін. Мұндай жағдайда **дифференциалдық спутниктік навигация технологиялары** пайдаланылады. Дифференциалдық навигацияның негізгі идеясы – координаттары дәл белгілі бір **базалық станцияның** навигациялық өлшеулерін пайдаланып, пайдаланушы қабылдағышындағы ортақ қателерді анықтау және оларды түзету. Бұл әдіс навигациялық жүйенің дәлдігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді.

2. Дифференциалдық GNSS жүйесінің жұмыс істеу принципі

Дифференциалдық GNSS жүйесінің негізгі элементтері:

- навигациялық спутниктер;
- координаттары дәл белгілі базалық станция;
- пайдаланушының GNSS қабылдағышы;
- түзетулерді есептеу жүйесі;
- түзетулерді пайдаланушыға жеткізу арнасы.

Базалық станцияның нақты координаттары алдын ала белгілі болады. Ол спутниктерден сигнал қабылдап, өзінің белгілі координаттары мен өлшенген навигациялық параметрлерін салыстырады.

Мысалы, базалық станцияның нақты координаты белгілі:

$\mathbf{X_\beta = (x_\beta, y_\beta, z_\beta)}$

Ал GNSS өлшеулерінің негізінде есептелген координат:

$\mathbf{\hat{X}_\beta = (\hat{x}_\beta, \hat{y}_\beta, \hat{z}_\beta)}$

болса, координаталық түзетулер:

$\mathbf{\Delta X_\beta = X_\beta - \hat{X}_\beta}$ (1)

түрінде анықталады.

Базалық станция осы түзетулерді пайдаланушы қабылдағышына жібереді.

Дифференциалдық әдістің тиімділігі базалық станция мен пайдаланушы қабылдағышы бір-біріне жақын орналасқанда жоғары болады. Себебі екі нүктедегі атмосфералық және басқа да қателердің белгілі бір бөлігі өзара ұқсас болады.

3. Дифференциалдық түзетулердің мәні

GNSS қабылдағышының псевдоқашықтық өлшеуін жалпы түрде былай көрсетуге болады:

$\mathbf{P = \rho + c(\delta t_u - \delta t_s) + I + T + \varepsilon}$ (2)

Мұндағы:

- P – өлшенген псевдоқашықтық;
- ρ – спутник пен қабылдағыш арасындағы нақты геометриялық қашықтық;
- c – жарық жылдамдығы;
- δt_u – пайдаланушы қабылдағышының сағат қатесі;
- δt_s – спутник сағатының қатесі;
- I – ионосфералық кідіріс;
- T – тропосфералық кідіріс;
- ε – өлшеу қатесі.

Базалық станцияның координаттары белгілі болғандықтан, ол нақты геометриялық қашықтықты есептей алады. Өлшенген және есептелген псевдоқашықтықтардың айырмасы арқылы түзету анықталады:

$\mathbf{\Delta P = P_{true} - P_{meas}}$ (3)

Бұл түзету пайдаланушы қабылдағышына беріледі.

Пайдаланушы қабылдағышы өзінің өлшеуіне түзетуді енгізіп:

$\mathbf{P_{corr} = P_{meas} + \Delta P}$ (4)

түріндегі түзетілген псевдоқашықтықты алады.

Осыдан кейін түзетілген навигациялық өлшеулер бойынша пайдаланушының координаттары қайта есептеледі.

4. Дифференциалдық навигацияның негізгі артықшылықтары

Дифференциалдық технологияның басты артықшылығы – **ортақ қателердің бір бөлігін жою мүмкіндігі**.

Базалық станция мен пайдаланушы бір спутниктерден сигнал қабылдайтындықтан, олардың өлшеулеріне әсер ететін кейбір қателер ұқсас болады.

Оларға:

- спутник сағатының қателігі;
- спутниктің орбиталық параметрлерінің қателігі;
- ионосфералық әсердің бір бөлігі;
- тропосфералық әсердің бір бөлігі.

жатады.

Егер базалық станция мен пайдаланушы арасындағы қашықтық аз болса, атмосфералық жағдайлар да ұқсас болады.

Сондықтан дифференциалдық түзетулерді пайдалану арқылы позициялау дәлдігін арттыруға болады.

5. DGPS технологиясы

Дифференциалдық GPS технологиясы **DGPS (Differential GPS)** деп аталады.

DGPS жүйесінде базалық станция GPS спутниктерінің сигналдарын қабылдайды және өзінің нақты координаттары негізінде түзетулерді есептейді. Бұл түзетулер радиобайланыс, ұялы байланыс немесе басқа ақпарат тарату арналары арқылы пайдаланушыға берілуі мүмкін.

DGPS көмегімен автономды навигациямен салыстырғанда координаттарды анықтау дәлдігі едәуір жақсарады.

DGPS технологиясының негізгі қолдану салалары:

- теңіз навигациясы;
- ауыл шаруашылығы;
- көлік жүйелері;
- геодезиялық жұмыстар;
- картография;
- мониторинг жүйелері.

6. DGNSS ұғымы

DGPS тек GPS жүйесіне қатысты ұғым болса, **DGNSS (Differential Global Navigation Satellite System)** бірнеше спутниктік навигациялық жүйелердің дифференциалдық технологияларын қамтиды.

DGNSS құрамында GPS, ГЛОНАСС, Galileo және BeiDou жүйелерінің сигналдарын пайдалануға болады.

Бірнеше навигациялық жүйені біріктірудің артықшылықтары:

- көрінетін спутниктер саны көбейеді;
- спутниктердің геометриялық орналасуы жақсарады;

- DOP көрсеткіштері төмендеуі мүмкін;
- навигациялық шешімнің тұрақтылығы артады;
- сигналдардың уақытша жоғалу ықтималдығы азаяды.

7. RTK технологиясы

Жоғары дәлдікті спутниктік навигацияда **RTK (Real-Time Kinematic)** технологиясы кеңінен қолданылады.

RTK жүйесі псевдоқашықтық өлшеулерімен қатар спутниктік сигналдың **тасымалдаушы фазасын** пайдаланады.

Тасымалдаушы фазаның өлшеу дәлдігі псевдоқашықтық өлшеуіне қарағанда әлдеқайда жоғары болуы мүмкін. Сондықтан RTK технологиясы сантиметрлік деңгейдегі позициялау міндеттерін шешуде қолданылады.

RTK жүйесінде әдетте:

- базалық станция;
- ровер немесе жылжымалы қабылдағыш;
- спутниктер;
- түзетулерді беру арнасы

қолданылады.

Базалық станция мен ровер бір спутниктердің сигналдарын қабылдайды. Фазалық өлшеулерді салыстыру арқылы пайдаланушының координаттары жоғары дәлдікпен есептеледі.

RTK технологиясының негізгі қолданылу салалары:

- геодезия;
- құрылыс;
- кадастр;
- дәлме-дәл ауыл шаруашылығы;
- жол құрылысы;
- роботтандырылған жүйелер;
- ұшқышсыз аппараттар.

8. RTK жүйесіндегі фазалық өлшеу

Тасымалдаушы фазаны өлшеудің қарапайым моделі:

$$\mathbf{\Phi = \rho/\lambda + c(\delta t_u - \delta t_s)/\lambda + N + \varepsilon\Phi} \quad (5)$$

Мұндағы:

- Φ – тасымалдаушы фазаның өлшенген мәні;
- ρ – спутник пен қабылдағыш арасындағы қашықтық;
- λ – сигналдың толқын ұзындығы;
- c – жарық жылдамдығы;
- δt_u – қабылдағыш сағатының қатесі;
- δt_s – спутник сағатының қатесі;
- N – бүтін фазалық белгісіздік;
- εΦ – фазалық өлшеу қатесі.

RTK жүйесіндегі маңызды міндеттердің бірі – **бүтін фазалық белгісіздікті N анықтау**.

Бұл міндет шешілгеннен кейін қабылдағыштың координаттарын өте жоғары дәлдікпен есептеуге мүмкіндік пайда болады.

9. RTK режимдерінің ерекшеліктері

RTK жүйесінде бірнеше жұмыс режимі кездеседі.

Single режимінде фазалық белгісіздік толық шешілмеген болады және дәлдік салыстырмалы түрде төмен.

Float режимінде фазалық белгісіздік белгілі бір деңгейде бағаланады, бірақ оның бүтін мәні нақты анықталмаған.

Fixed режимінде фазалық белгісіздік бүтін сан ретінде анықталады. Бұл жағдайда координаттарды анықтау дәлдігі ең жоғары деңгейге жетеді.

Сондықтан жоғары дәлдікті геодезиялық жұмыстарда RTK Fixed режимін алу маңызды.

10. SBAS технологиясы

Дифференциалдық навигацияның тағы бір түрі – **SBAS (Satellite Based Augmentation System)**.

Бұл технологияда навигациялық түзетулер арнайы геостационарлық спутниктер арқылы пайдаланушыға жеткізіледі.

SBAS жүйесінің жалпы принципі:

1. Жердегі бақылау станциялары GNSS сигналдарын бақылайды.
2. Орталық жүйе навигациялық қателерді есептейді.
3. Түзету ақпараттары арнайы спутниктерге жіберіледі.
4. Геостационарлық спутник түзетулерді пайдаланушыларға таратады.
5. Қабылдағыш түзетулерді пайдаланып, координаттарды дәлірек анықтайды.

SBAS технологиялары авиацияда, теңіз навигациясында және басқа да жоғары сенімділікті қажет ететін салаларда қолданылады.

11. Дәлдікті арттырудың басқа технологиялары

Дифференциалдық түзетулерден басқа GNSS дәлдігін арттырудың бірнеше әдісі бар.

11.1. Көпжүйелі GNSS

Бірнеше спутниктік навигациялық жүйелерді бірге пайдалану арқылы навигациялық шешімнің тұрақтылығын арттыруға болады.

Мысалы, GPS + ГЛОНАСС + Galileo + BeiDou сигналдарын бір қабылдағышта өңдеу спутниктердің жалпы санын арттырады.

11.2. Көпжиілікті өлшеулер

Қазіргі GNSS қабылдағыштары бірнеше жиіліктегі сигналдарды қабылдай алады.

Көпжиілікті өлшеулер ионосфералық әсерді бағалауға және азайтуға мүмкіндік береді.

11.3. Тасымалдаушы фазаны пайдалану

Псевдоқашықтықпен қатар тасымалдаушы фазаны пайдалану жоғары дәлдікке мүмкіндік береді.

Бұл технология RTK және басқа да жоғары дәлдікті позициялау әдістерінің негізін құрайды.

11.4. GNSS және INS интеграциясы

GNSS сигналдары уақытша жоғалған кезде инерциялық навигациялық жүйе қозғалыс параметрлерін бағалауды жалғастыра алады.

Сондықтан GNSS + INS интеграциясы көлік, авиация және робототехника салаларында тиімді.

12. Дәлдікке әсер ететін факторлар

Дифференциалдық технологиялар барлық қателерді толық жоймайды. Дәлдікке келесі факторлар әсер етеді:

- базалық станция мен ровер арасындағы қашықтық;
- спутниктердің геометриялық орналасуы;
- ионосфералық жағдай;
- тропосфералық жағдай;
- көпсәулелі таралу;
- қабылдағыштың техникалық сипаттамалары;
- антеннаның сапасы;
- түзетулерді беру арнасының тұрақтылығы.

Базалық станция мен пайдаланушы арасындағы қашықтық ұлғайған сайын олардың атмосфералық жағдайларының айырмашылығы артады. Сондықтан дифференциалдық түзетулердің тиімділігі төмендеуі мүмкін.

Бұл құбылыс **дифференциалдық корреляцияның төмендеуі** ретінде қарастырылады.

13. Дифференциалдық жүйенің дәлдігін бағалау

Навигациялық жүйенің тиімділігін бағалау үшін координаттардың нақты және өлшенген мәндері салыстырылады.

Координат қатесі:

$$\Delta X = X_{meas} - X_{true} \quad (6)$$

түрінде анықталады.

Үш өлшемді позициялау қатесі:

$$\Delta R = \sqrt{[(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2]} \quad (7)$$

формуласы арқылы есептеледі.

Егер N өлшеу жүргізілсе, орташа позициялау қатесі:

$$\Delta \bar{R} = (1/N) \cdot \Sigma \Delta R_i \quad (8)$$

формуласы бойынша анықталады.

Ал орташа квадраттық қате:

$$RMSE = \sqrt{[(1/N) \cdot \Sigma (\Delta R_i)^2]} \quad (9)$$

формуласы арқылы есептеледі.

RMSE көрсеткішінің аз болуы жүйенің жоғары дәлдікпен жұмыс істейтінін көрсетеді.

14. Дифференциалдық жүйелердің қолданылу салалары

Дифференциалдық GNSS технологиялары көптеген салаларда қолданылады.

Геодезияда RTK технологиясы координаттарды жоғары дәлдікпен анықтау үшін пайдаланылады.
Ауыл шаруашылығында дәлме-дәл егіншілік жүйелерінде тракторлар мен ауыл шаруашылығы техникасының қозғалысын басқару үшін қолданылады.
Құрылыста машиналар мен механизмдердің координаттарын бақылауға мүмкіндік береді.
Көлік жүйелерінде көлік құралдарының орналасуын анықтау және қозғалысын бақылау үшін пайдаланылады.
Авиацияда навигацияның дәлдігі мен сенімділігін арттыру үшін кеңейту жүйелері қолданылады.
Ұшқышсыз ұшу аппараттарында жоғары дәлдікті ұшу траекториясын қалыптастыру және автоматты басқару міндеттері шешіледі.
Ғарыш техникасында спутниктердің және басқа ғарыш объектілерінің қозғалысын бақылау міндеттері үшін жоғары дәлдікті навигациялық технологиялардың маңызы зор.

15. Қорытынды

Дифференциалдық жер серіктік навигациялық жүйелер GNSS технологияларының дәлдігін арттырудың маңызды бағыты болып табылады.
Дифференциалдық навигацияның негізгі принципі – координаттары дәл белгілі базалық станцияның өлшеулерін пайдаланып, спутниктік сигналдарға әсер ететін ортақ қателерді бағалау және пайдаланушыға түзетулер беру.
DGPS және DGNSS технологиялары автономды навигациямен салыстырғанда позициялау дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді. Ал RTK технологиясы тасымалдаушы фазаны пайдаланып, сантиметрлік деңгейдегі жоғары дәлдікті позициялауға жағдай жасайды.
Сонымен қатар SBAS, көпжүйелі GNSS, көпжиілікті өлшеу, тасымалдаушы фазаны өңдеу және GNSS/INS интеграциясы сияқты технологиялар навигациялық жүйелердің дәлдігі мен сенімділігін одан әрі арттырады.
Дифференциалдық навигация жүйесін таңдағанда қажетті дәлдік, базалық станция мен пайдаланушы арасындағы қашықтық, байланыс арнасының мүмкіндіктері, спутниктердің геометриялық орналасуы және қоршаған орта жағдайлары ескерілуі қажет.
Жалпы алғанда, дифференциалдық GNSS технологиялары **метрлік дәлдіктен сантиметрлік дәлдікке дейінгі навигациялық міндеттерді шешуге мүмкіндік беретін қазіргі заманғы маңызды технологиялардың бірі** болып табылады.

Бақылау сұрақтары

1. Дифференциалдық спутниктік навигация дегеніміз не?
2. Дифференциалдық GNSS жүйесінің негізгі элементтерін атаңыз.
3. Базалық станцияның негізгі қызметі қандай?
4. Базалық станцияның координаттары неліктен дәл белгілі болуы керек?
5. Дифференциалдық түзету дегеніміз не?
6. Дифференциалдық түзетулер қалай қалыптастырылады?

7. Дифференциалдық навигацияның негізгі артықшылығы қандай?
8. Базалық станция мен пайдаланушы арасындағы қашықтық дәлдікке қалай әсер етеді?
9. DGPS дегеніміз не?
10. DGNSS пен DGPS арасындағы айырмашылық қандай?
11. Дифференциалдық навигация қандай қателерді азайтуға мүмкіндік береді?
12. RTK технологиясының жұмыс істеу принципі қандай?
13. RTK технологиясында тасымалдаушы фазаның қандай маңызы бар?
14. RTK Fixed және Float режимдерінің айырмашылығы қандай?
15. Фазалық белгісіздік дегеніміз не?
16. RTK технологиясы қандай салаларда қолданылады?
17. SBAS технологиясы дегеніміз не?
18. SBAS жүйесінде түзету ақпараттары пайдаланушыға қалай жеткізіледі?
19. Көпжүйелі GNSS технологиясының қандай артықшылықтары бар?
20. Көпжиілікті GNSS қабылдағыштарының артықшылығы неде?