



Nemzeti Közsolgálati Egyetem

Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar

Katonai Üzemeltető Intézet

Katonai Repülő Tanszék



VADÁSZGÉP RÁVEZETÉSEINEK SZIMULÁCIÓJA ÉS ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A konzulens, beosztása:

Dr. Ludányi Lajos, főiskolai tanár

Szakfelelős:

Dr. Békési Bertold alezredes, egyetemi docens

Készítette:

Szegény Tamás honvéd tisztjelölt

Szolnok

2014

Tartalomjegyzék

Bevezetés	4
1. Légi célra való rávezetés kialakulásának rövid áttekintése.....	6
2. A tiszta elfogás módszere.....	10
2.1 A tiszta követéses módszer értékelése	12
2.2 A blokkvázlat felépítése	13
3. Az előretartásos elfogás módszere	20
3.1 Előretartásos megközelítési módszer értékelése.....	21
3.2 A blokkvázlat felépítése	24
4. Párhuzamos elfogási módszer	27
4.1 Lehetséges párhuzamos megközelítések	28
4.2 Célrávezetés lehetőségei nagyobb sebességű légi célra	29
4.3 Párhuzamos megközelítési módszer minősítése	29
4.4 A blokkvázlat felépítése	30
5. A célrávezetési módszerek összehasonlítása	33
5.1 Théta, célzási szög	33
5.2 Céltávolság időbeni változása.....	34
5.3 Elfogási idő	35
5.4 Megközelítési sebesség.....	36
5.5 Doppler-frekvenciaváltozás	37
5.6 Az összehasonlítások összegzése	38
6. Vadászgép és pilóta.....	39
6.1 A Doppler-radar mérési elve	40
6.1.1 A Doppler-radar üzemmódjait meghatározó összefüggések	41
6.2 Vadászgép és pilóta komplex blokkvázlata	41
6.3 Példa, a vadászgép állapotterez egyenletének felépítésére	42

Összegzés.....	46
Felhasznált irodalom.....	48
Melléklet.....	49
Függelékek.....	51

BEVEZETÉS

A levegő meghódításának következményeként természetesen nem csak utasok szállítására kezdték használni a repülőeszközöket. A technika fejlődésével megjelentek a legelső harcászati feladatok ellátó repülőgépek is, melyek már az I. világháború idején bevetésre kerültek. Kialakultak a kezdetleges légi harcok, melyeket fedélzetre szerelt géppuskákkal vívtak meg. Az ilyen típusú hadviselés megmaradt a II. világháború során folytatott légi harcok esetében is. Azonban 20. század közepétől kezdve a légi harc rakéták rohamosan elterjedtek a vadászgépeken és ez valamilyen szinten meg is változtatta az akkori felfogást a légi küzdelmekről. A rakéták villámgyors elterjedése előtt a vadászgépek támadást csak fedélzeti géppuskákkal és géppuskákkal tudtak végrehajtani. Az új fegyverzet megjelenését követően úgy gondolták, hogy a rakéták megoldásul szolgálhatnak bármiféle manőver esetén is, ha a cél kitérni készült. Azonban ez a feltételezés még sem bizonyult helytállónak, hiszen egy adott rakétaindításnak is megvoltak a feltételei. A légi harc rakéta célba jutása csak bizonyos kritériumok beteljesülésével vált megoldhatóvá, és az irányítása legyen az rádió vagy infravörös, legtöbb esetben csak az ellenséges légi cél hátsó légteréből volt indítható. Az sem elhanyagolható tényező, hogy a pilóta milyen fordulóban indítja azt, mert a rá és a rakétára ható túlterhelés is befolyásolja a célba jutás sikerességét. Ráadásul a légi cél kitérésénél, amely szögsebességét a rakéta nem képes követni, a célbefogás megszűnik és a rakéta nem fogja tovább üldözni a célt.

Ezeket a megállapításokat figyelembe véve a különféle légi harcok esetében egyértelműen elfogadható az a tény, hogy a repülőgépek levegőben való mozgását számos és igen bonyolult egyenlet írja le. Ezen egyenletek nem más, mint összetett nemlineáris differenciálegyenletek sorozata. Habár bizonyos feltételek mellett ezek linearizálhatóak és egyszerűsíthetőek, mozgásuk modellezése még ebben a formában sem számít egyszerű feladatnak. A differenciálegyenletek által felírható mozgások látványos szimulációja érdekében a rendszer felépítését MATLAB® SIMULINK program felhasználásának segítségével hajtom végre. A különböző számítógép alapú szimulációk végrehajtására a program kiváló és egyszerű megoldásokat kínál. Segítségével olyan hálózatok is megszerkeszthetőek, mint például a repülőgép térbeli mozgásának szimulációja a nemlineáris mozgásegyenletek felhasználásával. Ráadásul, segítségül szolgálhat számos szabályozástechnikai modell megvalósításában és megalkotásában.

Az ilyen típusú nemlineáris differenciálegyenletekkel leírt mozgások szimulá-

ciója számos területen alkalmazható. Legfontosabb szférának tekinthető az oktatás, hiszen a repülőgép mozgásformáinak bonyolult és olykor átláthatatlan vizsgálata és a paramétereinek szemléltetésére kiválóan alkalmazható a SIMULINK program. A program rengeteg olyan hálózati elemet tartalmaz, melyekkel az általam is szimulációra kerülő megközelítések esetében is könnyedén megalkothatóak.

Azért határoztam el magam amellett, hogy ilyen témát dolgozok fel a szakdolgozatomban, mert a különböző elfogásoknak nem csak irányítói szempontból, de ugyanúgy mérnöki oldalról is jelentőségük van. Más részről az egyes vadászgépek elfogásának szimulációja ilyen módon még nem került megvalósításra. A SIMULINK szoftverrel való kivitelezés azért is lényeges szempont, mert a villamosmérnöki körökben igen elterjedt és népszerű. Számos eset látványosan szemléltethető, vagy akár különböző problémák forrásának feltárására is kiváló alternatívát nyújthat.

Az általam kiválasztott célrávezetési módszerek az alapvető technikák közé tartozik. A mozgásukat leíró jellemző differenciálegyenletek alapján a hálózati struktúra kisebb gond nélkül megépíthető, viszont szimulációk látványos eredményt mutatnak. Dolgozatom első részében a tiszta, az előretartásos és a párhuzamos megközelítési formákat ismertetem és értékelem. Elemzem a felírt modellek struktúráját, majd a három célrávezetés legfontosabbnak vélt paramétereit összehasonlítom.

A második részben bemutatom a vadászgép és a pilóta közötti kapcsolatot, a fedélzeti navigációs és felderítő berendezés működési elvét. Ezek után elmagyarázom, hogy a különböző paraméterek milyen úton és módon kerülnek feldolgozásra a fedélzeti rendszerekben, a lokátortól kezdve a fedélzeti számítógépen keresztül a pilótáig. Kifejezetten segíti a magyarázatot egy direkt erre a célra megszerkesztett „vadászgép-pilóta” hatásvázlat. Illetve példát mutatok a SIMULINK programban a vadászgép állapotteres egyenletének hálózati megszerkesztésére.

A dolgozatomban célja nem az, hogy egy új, bármilyen helyzetben alkalmazható elfogási módszert vázoljak fel, sokkal inkább az alapvető módszerek mozgásainak szimulációja a SIMULINK programban. A szoftver által szimulált megközelítések paramétereinek alapján az eltérések és hasonlóságok meghatározhatóak [1][2].

1. LÉGI CÉLRA VALÓ RÁVEZETÉS KIALAKULÁSÁNAK RÖVID ÁTTEKINTÉSE

A technika fejlődésével párhuzamosan a légierőnél, azon belül is a vadászrepülőknél kezdték el alkalmazni az elfogások elméletét, az ellenséges légi célok leggyorsabb megközelítésére, azok legrövidebb úton való befogására a lehető legrövidebb idő alatt. Az összes olyan repülési formát, ami csak a cél megközelítésére és elfogására szolgál, elfogási-repülésnek nevezzük. Ezzel ellentétben azokat a tevékenységeket, amelyek az ellenséges légi cél megsemmisítésére irányulnak, elfogásnak hívjuk.

Fontos szem előtt tartani a kettő közötti különbséget, hiszen könnyen összekeverhetők. Különböző esetekben az elfogás kifejezés alatt értjük a vadászgép célrávezetési módszerét, az általuk kivitelezett repülést a légi céllal való találkozásig, illetve a fenyegető, ellenséges célok megsemmisítését. Elméleti és gyakorlati alkalmazás során az „elfogás” szakkifejezést két célrávezetési módszer esetében alkalmazzuk, amelyeknél az elfogó vadászgép repülési pályája folyamatosan egyenes vonalú, illetve a légi cél nem manőverező mozgást végez. Ez a két módszer az úgynevezett egyenes és párhuzamos megközelítési módszerek. Ezen felül ugyancsak elfogásnak nevezzünk minden olyan vadászgép tevékenységet, amely a légi cél elfogására irányul, függetlenül attól, hogy a célrávezetés milyen módon történik. A rárepülést végre lehet hajtani repülőtéri készülségből vagy levegőben való készülségből, őrjáratozásból. Mind a két esetben történő riasztás alkalmával a célrávezetési műveletnek sikeresnek kell lenniük. Habár repülőtéri készülségből ez csak akkor lehet sikeres, ha a légi cél eléggé nagy távolságban van, és a vadászgépek a szükséges magasságig való felemelkedést utánégető üzemmódban végzik. A saját csapatok és objektumok megfelelő védelme érdekében a leghatékonyabb, ha a készülséget ellátó vadászgép őrjáratozásból hajtja végre a célrávezetést. Ez a legmegbízhatóbb módszer a feladat végrehajtására. Az őrjáratozó gépek folyamatos levegőben való reptetése viszont igen sok erő és eszközráfordítást igényel. A különböző légi célok elfogása során alkalmazott módszerek a legbonyolultabbnak mondható repülési fajták egyike, amelyeket természetesen mind háborús, de még békeidőben is végrehajtanak. Bonyolultságát fokozza a kevés idő, ami a teljes elfogás rendelkezésére áll, ráadásul, ha az ellenséges cél növeli repülési sebességét, az erre szánt elfogási idő még jobban megnyúlhat. Ezen kívül a felderítésre és célkutatásra alkalmas eszközök feladatai is korlátozottak, valamint a felderítés pillanatától a kivezetésig számított idő is igen tetemes. A sikeres elfogás függ a repülési magasságtól, valamint az ott jelen lévő időjárási viszonyoktól is.

A célrávezetések általában szakaszokra bontjuk. Az elfogási repülés első szakaszában történik a földről történő kivezetése harcászatiilag előnyös helyzetbe. A második szakaszban a vadászrepülőgép önállóan megkezd a légi cél megközelítését a fedélzeti eszközök segítségével és saját látása alapján, majd felveszi a kedvező kiindulási helyzetét. A célrávezetés addig tart, amíg az elfogó fel nem vette a támadáshoz szükséges kiinduló pozíciót.

A készenlétet adó vadászgépek az elfogási repülést az alábbi sorrendben hajtják végre. Riasztást követően a vadászgépek a felszállást a harcálláspont parancsai alapján hajtják végre, majd kirepülnek az célrávezetés kezdőpontjába. A további célmegközelítéshez szükséges parancsokat megkapják és a repülést az alapján végzik.

Az ellenséges légi célra való rávezetést természetesen megelőzi azoknak pontos felderítése és kapott információk feldolgozása, mert a helyes parancsot csak ezek alapján lehet kiadni. A vadászgép célrávezetése a megfelelő technikai eszközök és a harcállásponttól kapott parancsok segítségével történik. A technikai eszközök közé soroljuk a felderítő és célrávezető földi és fedélzeti rádiólokátor állomásokat, a rádiórelé-állomásokat, repülőgép-fedélzeti rádióállomásokat, harcálláspont műszaki berendezéseit, valamint az automatizált értesítő rendszer berendezéseit. Ily módon a rávezetések során széles körű földi és repülőgép-fedélzeti technikai berendezéseket alkalmaznak.

A légi célok elfogása különböző módszerekkel valósíthatóak meg, melyek közül a legalapvetőbbek az üldözéses, az egyenes és párhuzamos megközelítések. A felsorolt lehetőségek közötti különbséget valójában a mozgást leíró törvényszerűségek okozzák. A célrávezetés lehetőségei elsősorban az ellenséges célra való rávezetés irányának meghatározásától függenek. Mind három módszer rá jellemző pozitív és negatív tulajdonságokkal rendelkezik. Az elfogási műveletek bonyolultsága miatt mindenféle tényezőt, legyen az kedvező vagy kedvezőtlen a vadászgép számára, figyelembe kell venni, és számolni kell a hatásukkal. A módszerek sikeres alkalmazása függ az adott harcászati helyzettől és a vadászrepülőgép fedélzetére felszerelt fegyverrendszer jellemzőitől. Akármelyik elfogási eljárást alkalmazzuk a légi cél megközelítésére, mindenképpen szükséges meghatároznunk a folyamat lejátszódása alatt a két repülőgép kölcsönös helyzetét, távolságát, sebességeik irányát és nagyságát, azt a magasságot, amelyen az elfogást végrehajtják. Ugyan csak lényeges szempont a repülési irány, a vadászgép repülési üzemmódjának, illetve a találkozási pont helyzetének meghatározása.

A célrávezetési módszerek tárgyalása előtt szükséges ismertetni az elfogó vadászgép alapvető mozgástörvényeit a célhoz viszonyítva. Következésképpen a célrávezetési technikáktól függően a vadászgépnek a légi célhoz viszonyított mozgására kapunk egy meghatározott egyenletet. A kapott egyenletek esetében azt feltételezem, és a szimulációk során is feltételként veszem azt, hogy a megközelítések ideje alatt a két repülőgép ugyanazon a magasságon tartózkodik. Az egymáshoz viszonyított mozgásokat a vadászgép és a légi cél sebességeikkel, szögsebességeikkel, illetve repülési irány-szögeikkel jellemezzük. A célrávezetési módszerek tanulmányozásánál, szimulációjánál a sebességek nagysága és a repülési irányok állandóak, és a szögsebesség értékek pedig egyenlők nullával.

Az előbbieken említett három alapvető célrávezetési módszer mind elfogási és megközelítési tulajdonságaikban eltérnek egymástól. A rávezetéseknel használt kezdeti feltételek közötti differenciák nem számottevőek, viszont azok szimulációja, grafikai modelljei érdekes eltéréseket mutatnak. A továbbiakban a tiszta, az előretartásos és a párhuzamos célrávezetési módszereket általánosan ismertetem és elemzem a hozzájuk tartozó SIMULINK modelleket. Az ismertetések során érdemes tisztában lenni a megemlített alapfogalmaknak, amelyek elengedhetetlenek a rávezetési módszerek megértésében.

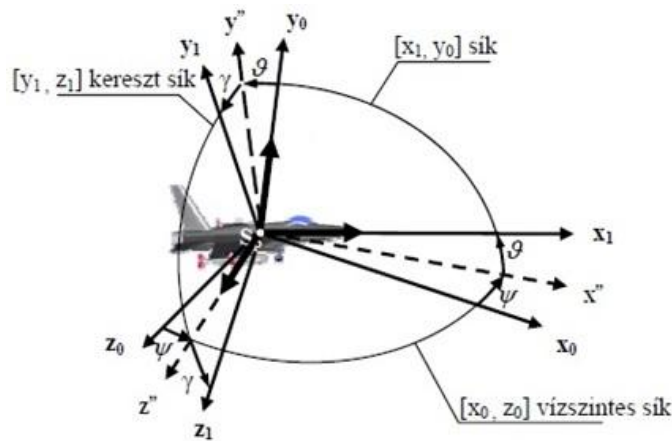
A korszerű sugárhajtású vadászgépek repülőfedélzeti fegyvervezérlő rendszerrel rendelkeznek. A berendezés hivatott a repülőgép vezetőt segíteni a lövészeti feladatának végrehajtásában úgy, mint célzásban, valamint tűzkiváltásban. A rendszer automatikusan átadja egy adatcsatornán az előretartási pont koordinátáit. Így az elfogó repülőgép fedélzetén elhelyezett fegyver a megfelelő irány tartásával tud lövést leadni. Megjegyzendő, hogy fegyver – mint eszköz – alatt nem feltétlen értünk kizárólag tűzfegyvert. Ez vonatkozik irányítható és nem-irányítható rakétákra egyaránt.

A repülőfedélzeti gépágyú nem tér ki az elfogó vadászgép hosszirányából, tehát a fegyvervezérlő rendszer rögzített állapotban van. Ilyen esetben a pilóta csak akkor képes pontos lövést leadni a célra, amikor az keresztezi annak hosszirányú vektorát. A vadászgép a tüzelés közben olyan útvonalon halad, amit szakszerűen támadási pályának nevezünk. Az egyszerűség kedvéért feltételezzük, hogy a vadászgép és a cél sebessége is állandó, valamint a fegyvervezérlő rendszer rögzített, tehát a lövedék pályája egybeesik a vadászgép sebességének irányával. A következőkben tegyük fel, hogy a támadási pálya egy síkbeli vonal, amit támadási síknak nevezünk. Ebben a síkban mozog az elfogó és a cél gép egyaránt. A két repülőgépet összekötő és a támadási síkban fekvő egye-

nest, célvonalnak nevezzük. Továbbá a célvonal rendelkezik egy bizonyos hosszúsággal, ami a két gép közötti távolságot fejezi ki, ez pedig az úgynevezett lőtávolság. Nyilvánvalóvá válik az, hogy a célgép sebességvektora, valamint a célvonal szöget fog bezárni egymással, amely időben változni is fog. A szög megegyezik azzal a szögértékkel, amit vadászgép lokátor antennája mér a célvonalon. A továbbiakban az egyszerűbb szemléltetés érdekében a szimulációkat kétdimenziós modellek fogják képezni [3][4].

2. A TISZTA ELFOGÁS MÓDSZERE

Az elfogások szimulációja minden esetben repülőgéphez illetve Földhöz rögzített koordináta-rendszerekben történik (1. ábra). Érdemes tisztázni a következőkben, hogy az említett esetekben a tengelyek valójában milyen irányba is mutatnak. A repülőgéphez kötött x_1 tengely a test orrának irányába mutat, az z_1 tengelye a jobb szárny felé, valamint a y_1 tengely ezekkel jobbsodrású rendszert alkot, tehát iránya lefelé fog mutatni. A rendszer origója a repülőgép tömegközéppontjában helyezkedik el. A Földhöz kötött y_0 tengely a Föld középpontjától felfelé, az x_0 tengelye az északi pólus felé mutat, illetve z_0 tengely az előbbiekkal ugyancsak jobb-sodrású rendszert alkot. A koordináta rendszer origója a Föld középpontja lesz. A harmadik típusú, úgynevezett sebesség, vagy szél koordináta rendszer a következőkben nem kerül felhasználásra.



1. ábra A repülőgéphez és a Földhöz kötött koordináta rendszer kapcsolata¹

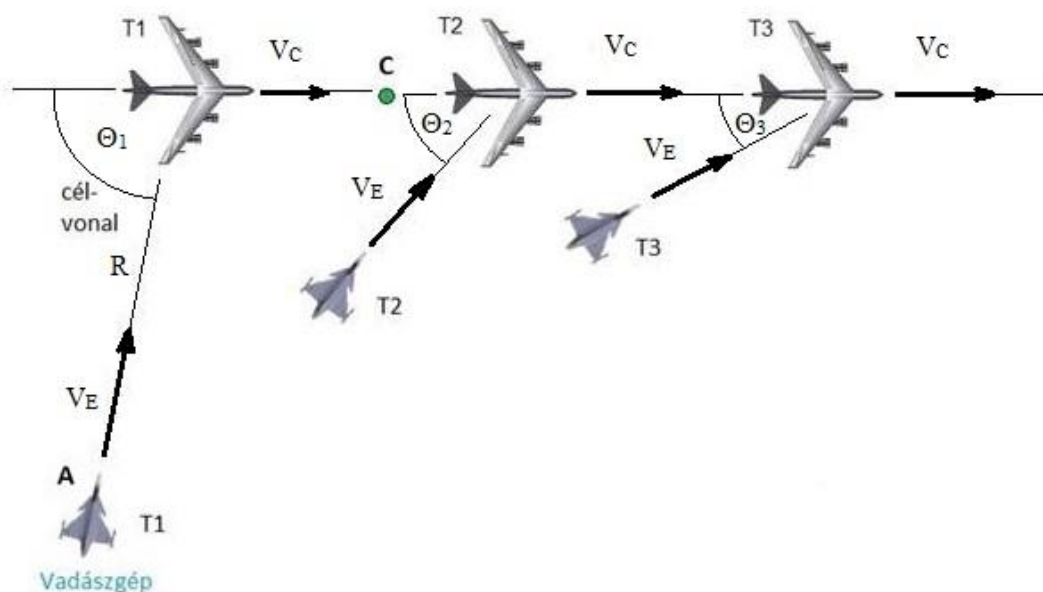
A megközelítési módszert más néven üldözésez elfogásnak is nevezik. A módszer lényege abból áll, hogy a harcállásponttól kapott utasítások alapján, vagy a repülőgép-fedélzeti berendezések segítségével a vadászgép sebességvektorát folyamatosan a légi célra irányítjuk. A megközelítés folyamán az elfogó-vadászrepülőgép mindvégig egy görbe vonalú pályán halad, amelyet üldözési görbének nevezünk. A célrávezetés során a célgépre történő célzási szög egyenlő a nullával. A vadászgép sebességvektora egyfolytában a légi célra mutat, így az cél hátsó légterébe fog kerülni. Éppen emiatt, az üldözésez módszert csak azokban az esetekben alkalmazzuk, amikor az üldöző repülési sebessége nagyobb, mint a légi célé. A céllal szembe való repülés esete kivételt képez, ekkor a légi cél sebességének értéke nagyobb is lehet az elfogóénál, viszont már ilyen mértékű válto-

¹ Szerkesztette a szerző (MS Paint), az alábbi irodalom alapján - Repülésszabályozó rendszerek szabályozóinak számítógépes analízise és szintézise (online) url: http://uni-nke.hu/downloads/konyvtar/digitgy/phd/2006/szegedi_peter.pdf

zások esetén az üldözés nem különbözik a párhuzamos megközelítés módszerétől.

A tanulmányozás során megfigyelhető a módszerre általában jellemző, a vadászgép által végrehajtott fordulók és bedöntési szögek változásai. A bedöntési szög olyan mértékben nő, amilyen mértékben az a légi célt megközelíti. Természetesen a bedöntési szög változása attól is függ, hogy a kezdeti célzási szög valójában milyen mértékű. Minél kisebb a célzási szöge érték a vadászpilótának annál nagyobb bedöntési szöggel kell számolnia, és a fordulót végrehajtania. Ebből kifolyólag a fordulóból adódó túlterhelések is jelentősen megnövekednek. A célzási szög értéke olyan mértékben is megváltozhat az üldözés során, amikor már a pilóta nem képes rajta tartani a gépet az üldözési görbén, így kénytelen olyan manőverrel korrigálni a pályáját, aminek következtében a túlterhelés átlépheti a megengedett értéket. A módszer ebben az esetben teljesen alkalmazhatatlan lesz. A vadászgép repülési pályájának vázlata a tiszta megközelítéses célrávezetés esetében a 2. ábrán látható.

A célrávezetési módszer fontos jellemzői közé tartozik a pálya görbültsége. Fontos, hiszen ettől függ az egész megközelítés sikere, hogy a vadászgép pilótája folyamatosan rajta tud-e maradni az üldözési görbén. A görbén való repülés során az üldöző repülési irányszöge folyamatosan változik. Annak érdekében, hogy a görbéről való leválás nem következessen be, a repülőgép fedélzetére történő parancsoknak megfelelő ütemben kell beérkezniük, hogy a pilóta időben nyomon tudja követni azokat. A pályán való rárepülés során a vadászgépnek folyamatosan mozgásban kell lennie, amelynek bedöntése és szögsebessége is változó lesz.



2. ábra Tiszta elfogás földi koordináta rendszerben ábrázolva²

² Szerkesztette a szerző (MS Paint)

A célrávezetések lefolyásából fakadóan szükséges áttekinteni azokat az eseteket, amikor a légi cél egyenes vonalú egyenletes mozgást végez, illetve amikor manővert végrehajtva repül. A nem manőverező légi cél megközelítése esetében a vadászgép rárepülése két elemi mozgás összetevőjeként is értelmezhető az üldözési görbén, amelyet „t” idő alatt tesz meg. Az egyik összetevő a légi cél irányába való mozgás, a másik pedig a cél sebességvektorára merőleges irányú mozgás. Abban az esetben, ha a légi cél állandó szögsebességgel fordulót is végrehajt, akkor az előbbi két elemi mozgáshoz hozzá kell adnunk egy harmadikat is, amely derékszöget zár be a légi cél irányával és ellentétes a forduló irányával. A célgép által végrehajtott forduló miatt a lehetséges megközelítés területe is elforog, melynek határai függetlenek a forgási szögsebességtől.

Ha a légi cél még akkor hajt végre kitérő manővert, amikor a vadászgép és a közte lévő távolság meglehetősen nagy, akkor a vadászgép ellenmanőverénél fellépő szögsebesség nem lesz túlságosan nagy, tehát a légi cél manővere lényegesen nem befolyásolja a rávezetést. Ezért érdemes addig, amíg tisztázzuk az ellenséges repülőgép által végrehajtott irányváltoztatás jellegét, célszerű a megközelítést az üldözéses módszerrel kivitelezni [3][4].

2.1 A tiszta követéses módszer értékelése

Az üldözéses megközelítés nagy előnye abban rejlik, hogy ebben az esetben a vadászgép repülési irányszögének meghatározása nem bonyolult művelet, hiszen a teljes folyamat során a célzási szög értéke megközelítőleg nulla, így a légi cél felderítése és befogása állandóan lehetséges a vadászpilóta számára, akár még az üldözés befejező szakaszán is. Azonban a fordulók és bedöntések szempontjából a pilótának nincsen könnyű dolga, mivel elsődleges feladata repülőgép célon tartása, így repülési iránya és a fordulók bedöntési szöge egyfolytában változik.

Ha összevetjük a többi célrávezetési módszerrel, láthatjuk, hogy ennél a módszerrel a leghosszabb az elfogó-vadászgép repülési útvonala, ez viszont kitolja az elfogáshoz szükséges időtartam mértékét. Ezzel azt érhetjük el, hogy az ellenséges célgép elfogása esetlegesen már a saját légterünkben történik meg, vagy éppenséggel nem történik meg időben. Az üldözés alkalmazásához és annak sikeres kivitelezéséhez szükséges feltétel az üldöző vadászgép nagy sebessége. Fontos, hogy a légi célét meghaladja. Csak ekkor lehet a vadászgépet a cél hátsó légterébe kiirányítani és azonos irányszöggel rávezetni. Ha ezek az alapfeltételek nem teljesülnek, az üldözéses módszer nem alkalmazható, mert a cél

igen jelentős mellső területét sem tudjuk felhasználni a rávezetés szempontjából. Ráadásul egy esetleges iránymanővernél a terület még jobban megnövekszik.

A vadászgép sikeres előzetes kivezetése esetén a megfelelő fedélzeti rendszerek segítségével az üldözés önállóan végrehajtható, a cél megközelítése lehetségessé válik. Abban az esetben is igen célszerű megragadni ezt a módszert a cél megközelítésére, amikor a vadászgép nagy távolságról próbálja azt felderíteni, és a célról kapott információk hiányosak. A sebesség nagysága és a repülés iránya nem határozható meg pontosan, így ez a célrávezetés a legcélszerűbb az ellenséges gép megközelítésére, további felderítésére. Természetesen, mivel az üldöző repülőgép által tartott irányszög nem függ a légi célra jellemző mozgásparaméterektől, vadászgép kivezetése a hátsó lég térbe a lehető leggyorsabban és a legrövidebb idő alatt megtörténik. Ezek birtokában arra a következtetésre jutunk, hogy ha a két gép koordinátáit meghatározzuk, az már elegendő paraméter ebben az esetben az üldözéses módszer sikeres végrehajtásának szempontjából. A technika fejlődésével már megjelenhetnek olyan fedélzeti berendezések és azoknak alkalmazási módszerei, amelyek segítségével az aktív zavar forrása egyértelműen megállapítható. Így a légi célra való rárepülés az üldözési görbén automatikusan végrehajtható [3][4].

2.2 A blokkvázlat felépítése

A bombázó repülőgép V_c sebességvektora két komponensre bontható fel. Egyik párhuzamos, a másik merőleges a célvonalra. A tiszta követésre felírható két differenciálegyenlet a következő:

$$\frac{dR}{dt} = V_c \cos \theta - V_e \quad (1)$$

$$R \frac{d\theta}{dt} = V_c \sin \theta \quad (2)$$

Az első egyenlet bal oldalán a lőtávolság időbeni változását $\left(\frac{dR}{dt}\right)$, jobb oldalon a céltárgy célvonallal párhuzamos komponensét és a vadászgép sebességét láthatjuk $(V_c \cos \theta - V_e)$.

Hasonló módon a második egyenlet bal oldalán megjelenik a lőtávolság (R), a sebességvektorok által bezárt θ szög időbeni változása $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$, illetve az egyenlet másik felén a céltárgy sebességének a célvonalra merőleges komponense $(V_c \sin \theta)$.

Figyeljük meg azt az esetet, ha a két egyenletet elosztjuk egymással, azaz

$$1. \text{ lépés: } \frac{dR}{R} \frac{dt}{d\theta} = \frac{V_c \cos \theta - V_e}{V_c \sin \theta} \quad (3)$$

$$2. \text{ lépés: } \frac{dR}{R} = \frac{V_c \cos \theta - V_e}{V_c \sin \theta} d\theta \quad (4)$$

Majd a két oldal integrálása és a lehetséges egyszerűsítések után a következőt kapjuk:

$$\int_{R_0}^R \frac{dR}{R} = \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{V_c \cos \theta - V_e}{V_c \sin \theta} d\theta \quad (5)$$

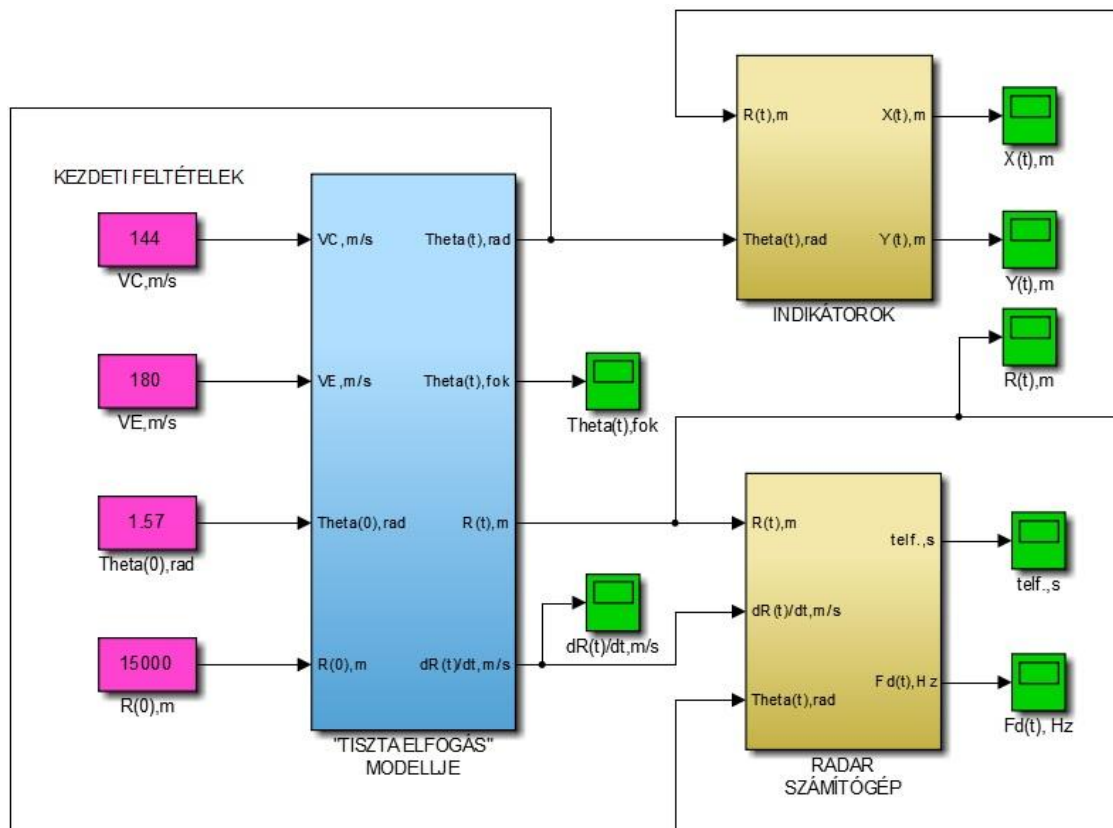
$$\frac{R}{R_0} = \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} \left(\frac{\tan \theta / 2}{\tan \theta_0 / 2} \right)^m \quad (6)$$

Az utolsó egyenletrendezés után a végső formában szereplő m index a V_e / V_c -t jelöli. A tiszta elfogás szimulációjához a kezdeti feltételeket válasszuk meg a következőképpen:

- $V_c = 144 \text{ m/s}$
- $V_e = 180 \text{ m/s}$
- $\theta_0 = 1,57 \text{ rad } (90^\circ)$
- $R_0 = 15000 \text{ m}$

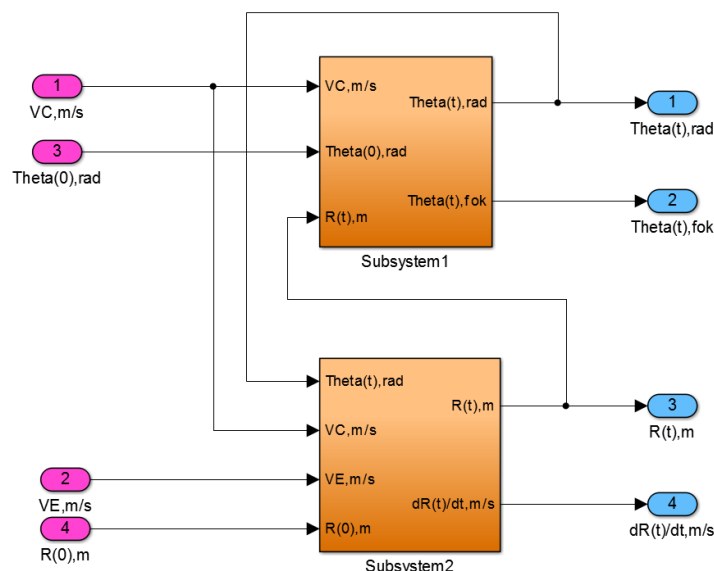
A különböző paraméterek megadása után a SIMULINK programban a differenciálegyenlet alapján felépített hálózat végrehajtja az elfogás szimulációját és szemlélteti a koordináta rendszerekben. A θ szög, illetve az R távolság alsó indexe jelöli a nulla időpillanatot, ahonnan a vadászgép megkezdje az elfogást. Ez mind jól megfigyelhető a Földhöz és a céltárgyhoz kötött koordináta rendszerekben. A könnyebb átláthatóság érdekében a bonyolultabb, és több elemből felépülő cellák egymásba lettek ágyazva. Így a rendszer egyszerűbben értelmezhető. Az alrendszerekbe egyszerűen betekinthetünk, ha a programban az adott blokkra duplán kattintunk. A vázlatban látható blokkok elkülöníthetőek (3–4. ábrák).

A kezdeti feltételek útját a rendszeren belül könnyen követhetjük. A sebesség, szög és távolság értékek a felépített hálózaton belül befutnak egy számító blokkba, amely tulajdonképpen két alrendszerből áll. A két alrendszer pedig természetesen a korábban megadott két alapvető differenciálegyenletre épül.



3. ábra Tiszta elfogás blokkvázlata³

Az egyes számú alrendszer (Subsystem1) foglalja magába a θ szög időben változó sebességére felírható egyenletet. Ide fut be a cél sebessége (V_C), a radiánban megadott kezdeti θ_0 szög (Théta, rad), illetve a távolság R_0 értéke az adott időpillanatban. Ezek közül mindössze a cél sebessége az, ami nem változik az idő elteltével, hiszen ezt a kezdeti feltételt állandónak választottuk meg azért, hogy a szimuláció egyszerűbben értelmezhető legyen.



4. ábra Tiszta elfogás blokkvázlatának kibontása⁴

³ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

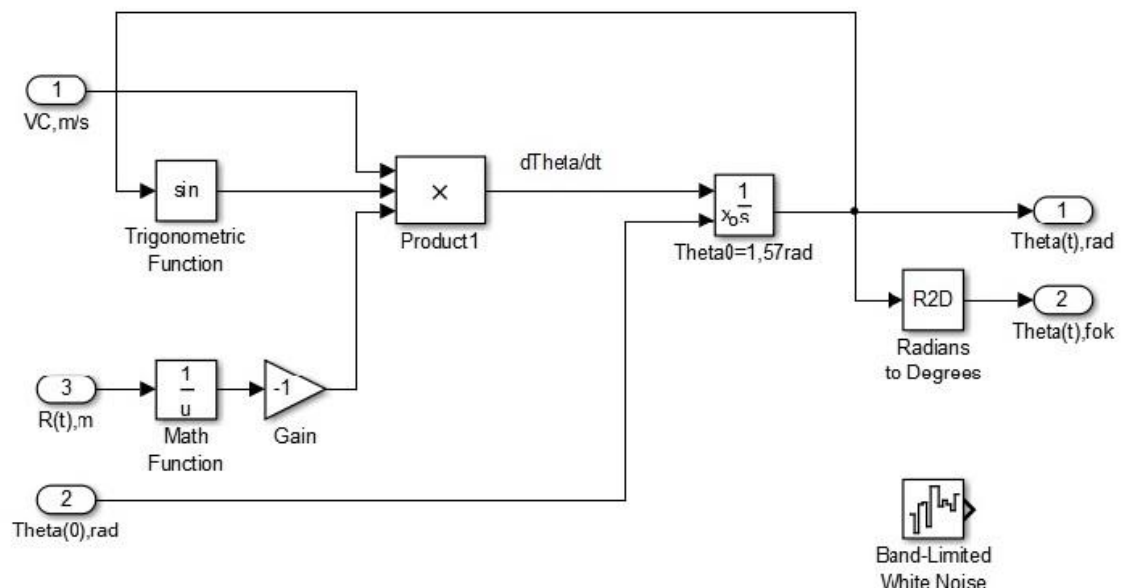
Az elfogást leíró matematikai modell két alrendszerének, illetve az indikátor és a radar számítógép felépítését a következő módon oldottam meg.

A Subsystem1 és Subsystem2-vel jelölt két alrendszer – ahogy korábban is említettem – az üldözéses elfogásra jellemző két alapvető differenciálegyenletre épül. Az elsőszámú alrendszer megépítésénél nem szükséges a legbonyolultabb elemek felhasználása, hiszen a differenciálegyenlet sem túl komplex. Ez vonatkozik a másik egyenletre is.

A blokkok összekapcsolása előtt érdemes a különböző egységeket egyesével beilleszteni. A differenciálegyenletből kiindulva a következő elemekre lesz szükségünk:

- trigonometrikus függvényt előállító blokk;
- matematikai függvényt előállító blokk, azon belül is a reciprokképző;
- egy erősítő, amely -1 -es erősítési tényezővel rendelkezik;
- egy szorzó blokk, amely bemenetének számát háromra célszerű állítani;
- a célzási szög radián értékét előállító blokk;
- radiánt fokba átalakító blokk;
- integrátor külső kezdeti érték beállítással.

Ezek felhasználásával és a megfelelőek összekapcsolásával megkapjuk az 5. ábrán látható modellt.



5. ábra Elsőszámú alrendszer felépítése⁵

Az előző tematikát követve a másik alrendszer modelljének felépítése is egyszerűen

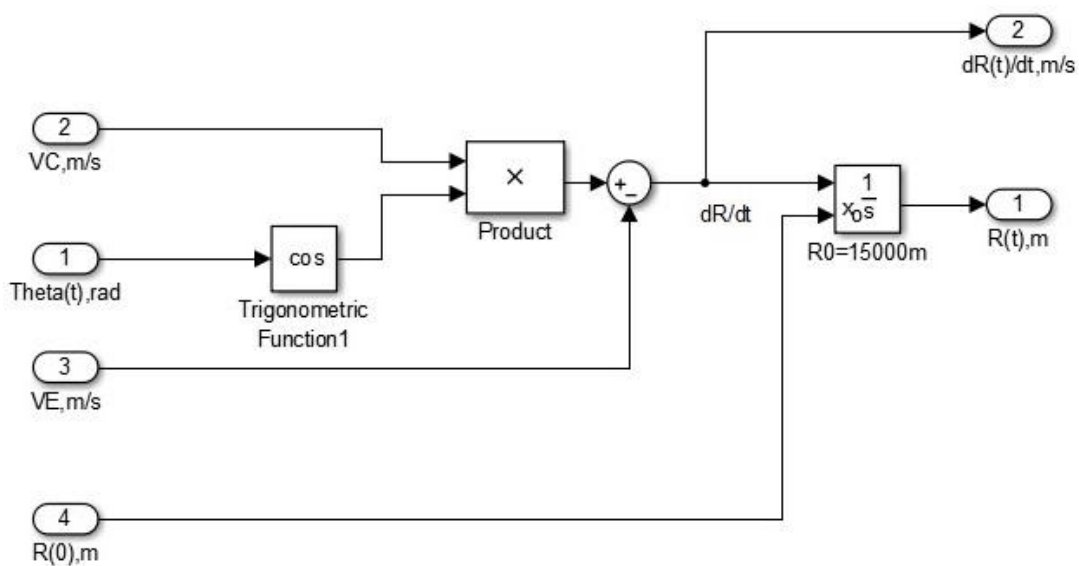
⁴ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

⁵ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

megoldható. Ebben az esetben is az előzőekhez hasonló elemekre van szükségünk, mégpedig:

- cosinus függvényt előállító blokk;
- két bemenetes szorzó blokk;
- egy negatív és egy pozitív bemenettel rendelkező összegző elem;
- a céltávolság értékét előállító blokk;
- integrátor külső kezdeti érték beállítással.

A 6. ábrán az összekapcsolt, kész hatásvázlatot láthatjuk.

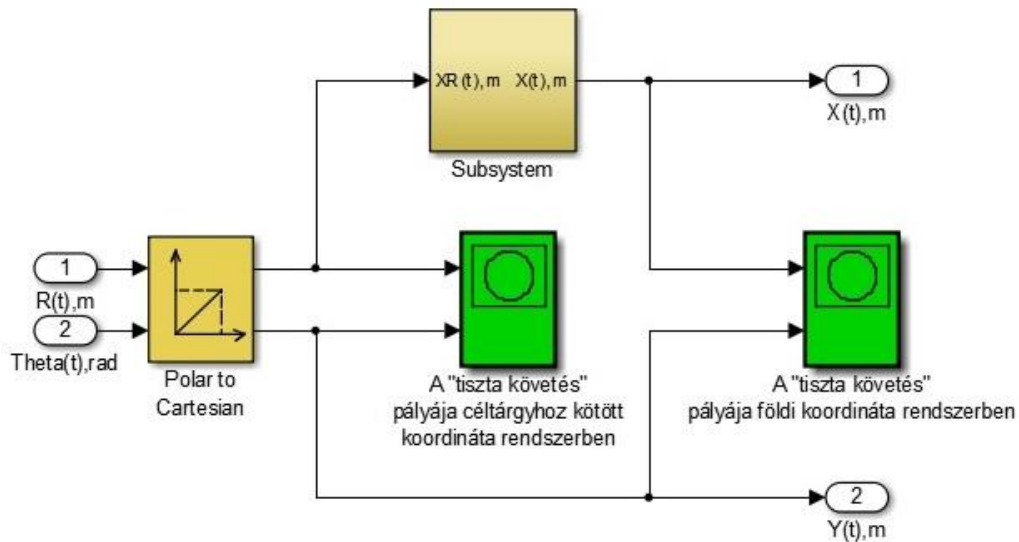


6. ábra Másodikszámú alrendszer felépítése⁶

Az előzőekben látott részletes levezetés egyelőre csak a tiszta elfogás matematikai modelljére vonatkozik. Azonban a komplett struktúrához kapcsolódik még az „Indikátorok” és a „Radar számítógép” egység. A rendszer alapos áttekintéséhez szükséges az utóbbi két blokk felépítésének elemzése is.

Az „Indikátorok” egység legfontosabb részét a polar koordináta rendszert Descartes típusba átkonvertáló blokk képezi (7. ábra). Erre egyszerűen azért van szükség, mert csak ebben a koordináta rendszer lehet szemléltetni a vadászgép repülési pályáját. Így megkapjuk az elfogás görbáját céltárgyhoz kötött, valamint Földhöz kötött koordináta rendszerben.

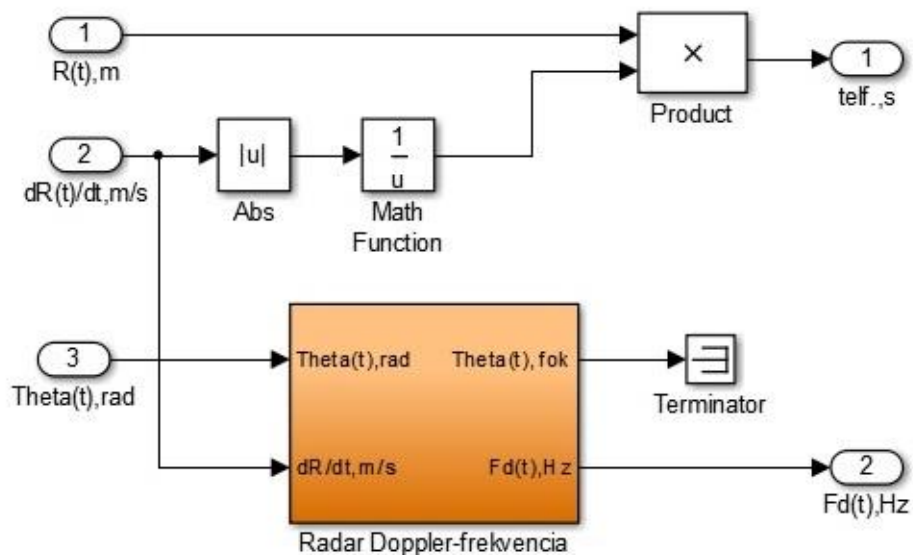
⁶ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)



7. ábra „Indikátorok” blokk felépítése⁷

Utolsó lépésként a „Radar számítógép” blokk megalkotásához szükséges elemek beillesztése következik. A blokk nem tartalmaz sok elemet, de szerepe mégis elengedhetetlen és ebben az egyszerűsített vázlatban könnyen átlátható (8. ábra). Az egységet megalkotó elemek:

- a függvény abszolút értékét képző blokk;
- reciprokképző;
- két bemenettel rendelkező szorzó blokk;
- a Doppler-frekvenciát eltérését kiszámító blokk.



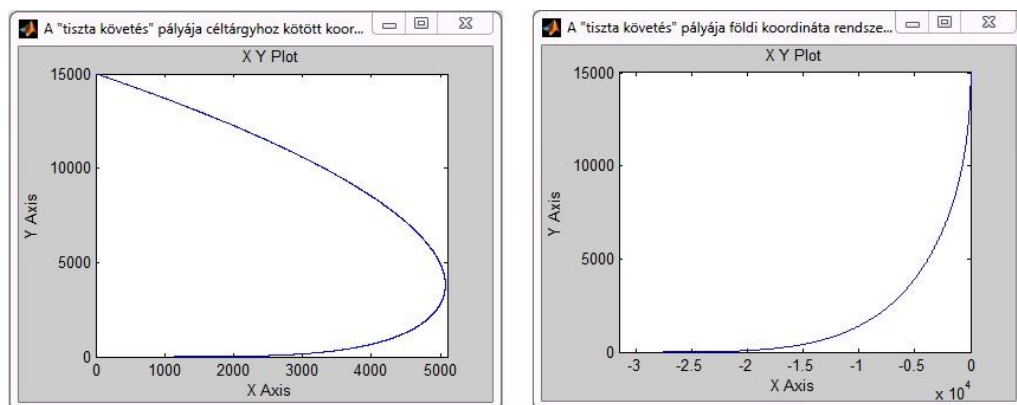
8. ábra „Radar számítógép” felépítése⁸

⁷ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

⁸ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

A SIMULINK programban kellően nagyszámú hálózati blokk található, így a megfelelőek kiválasztásával és összekapcsolásával a számunkra megfelelő rendszert könnyedén felépíthetjük, majd szimulálhatjuk. Jelen esetben az említett alrendszereket alkotó trigonometriai függvényeket előállító, szorzó, reciprokképző, integrátor, illetve radiánt fokba átalakító blokkok. A további két elfogásra jellemző modellek felépítése hasonló módon oldható meg.

Az így kapott feldolgozott értékek közül a távolság és a radiánban vett Θ szög a következő „Indikátorok” blokkba fut be. Innen újabb kiegészítő információkat kapunk arról, hogy az elfogás időbeni lefolyása során a kétdimenziós taktikai síkban a vadászgép és a célgép közötti X illetve Y irányú távolságok milyen mértékben és milyen gyorsan változnak (9. ábra).



9. ábra Az elfogás dinamikája a célhoz, illetve a Földhöz kötött koordináta rendszerben⁹

A továbbiak, mint a megközelítési sebesség, a távolság nagysága egy-egy időpillanatban, illetve a radián Θ szög a „Radar számítógép” blokkban jelenik meg [4].

⁹ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

3. AZ ELŐRETARTÁSOS ELFOGÁS MÓDSZERE

A célrávezetési módszer lényege ott mutatkozik meg, hogy a készenlétből felszálló vadászrepülőgépet egy egyenes vonalú pályán a földi harcálláspont parancsai alapján vezetjük ki a légi céltól adott távolságra és egy adott irányszögön. A vadász addig a pontig kerül kivezetésre, amíg el nem éri a megadott rakétaindítási távolságot. A meghatározandó indítási távolság például egy olyan esetben, amikor a megközelítés azonos irányon történik a következőképpen fog alakulni:

$$R = R_{indítás} + \Delta V t_{célzás} \quad (7)$$

A ΔV sebesség differencia a $\Delta V = V_E - V_C$ képletből, az vadászgép és a cél sebességének különbségéből adódik.

Az előbbieken meghatározott R távolságot a vadászgéptől az ellenséges légi célig mért távolságnak nevezzük.

Tehát az az eset, amikor a célrávezetés végig egyenes vonalon történik nem sokban tér el attól, amikor a vadászgép által végzett megközelítés párhuzamos módszerrel történik. Mindez abban különbözik, hogy a vadászt nem a találkozási pontig vezetjük, hanem a kedvező támadási pozíció felvételéig. A két repülőgép egymáshoz viszonyított helyzetét különösebben három fontos paraméterrel jellemezhetjük úgy, mint a R távolsággal, az L előretartási szöggel, illetve az elfogónak az ellenséges légi cél sebességvektorával bezárt Θ célzási szögével.

Miközben a vadászgép a célrávezetést hajtja végre, a légi cél és az általa vett célzási szögek folyamatosan, abszolút értékben változnak. A vadászgép célzási szöge megadott értékig csökken, akár nulláig is, viszont a légi cél célzási szöge, ami számunkra viszonylag egy elhanyagolható értéknek számít, pedig fokozatosan növekszik.

Mivel a megközelítési módszer alapja az előretartás, ennek következménye az lesz, hogy az ellenséges légi célhoz viszonyítva a vadászgép helyzete eltolódik, és a légi célra vett célzási szög egy meghatározott végleges értéket vesz fel. A megközelítés továbbfolytatásával az elfogó-vadász a légi cél mögé kerül és azt adott távolságon belül követi. Így a mozgás irányától függetlenül a vadászrepülőgép folyamatosan tudja követni a cél pályáját. Ebből azt a lényeges információt lehet leszűrni, hogy semmilyen bonyolultabb manővert nem kell a vadászgépnek végrehajtania ahhoz, hogy a kedvező támadási pozíciót felvegye, illetve kiküszöbölje a légi céllal való összeütközés esetét is.

A módszer csak egy esetben nem alkalmazható, mikor is a légi cél megközelítése találkozó irányszögön való rárepüléssel történik meg.

Ha a célrávezetés során a légi cél és a vadászgép között nagy távolság van, tehát $R \ll R_{max}$, akkor a R távolság olyan szinten elhanyagolható, hogy az előretartásos megközelítés tulajdonságai megegyeznek a párhuzamos megközelítés sajátosságaival. A légi célra történő célzási szög változása ebben az esetben nem meghatározó jellegű.

A távolság csökkenésével párhuzamosan a légi célra történő célzási szög értéke növekedni fog, így a két megközelítési módszer különbségei egyre inkább kiütköznek.

Megállapítható, hogy a Θ célzási szög az előretartásos megközelítés esetén folyamatosan csökkenő értékű lesz, mint a párhuzamos megközelítéskor. Ez lehetővé teszi azt, hogy a vadászpilóta a kisebb szögsebesség által megbízhatóbban derítse fel az ellenséges célt [3][4].

3.1 Előretartásos megközelítési módszer értékelése

A módszer vizsgálatának befejeztével összegezhetőek a különböző információk, miszerint a vadászgép repülési pályája mindaddig egyenes, amíg a kedvező támadási pontot fel nem veszi. A találkozási pontig való repülés a legrövidebb idő alatt fog bekövetkezni. Egyenes vonalon való repülésből következően a repülési útvonal és irány állandó lesz, tehát a vadászpilótának nem kell manővert végrehajtania. A feladat végrehajtása nem okoz különösebb erőfeszítést.

Az előretartással való célrávezetés lehetővé teszi olyan ellenséges légi célok megközelítését is, melyek repülési sebessége jóval meghaladja az elfogó-vadászt. Lényeges előnyként nem elhanyagolható az a sajátossága, hogy ez a módszer megbízhatóan kiküszöböli az ellenséges céllal való összeütközés lehetőségét azáltal, hogy a vadászpilótát a cél mögé, attól egy meghatározott távolságra irányítjuk.

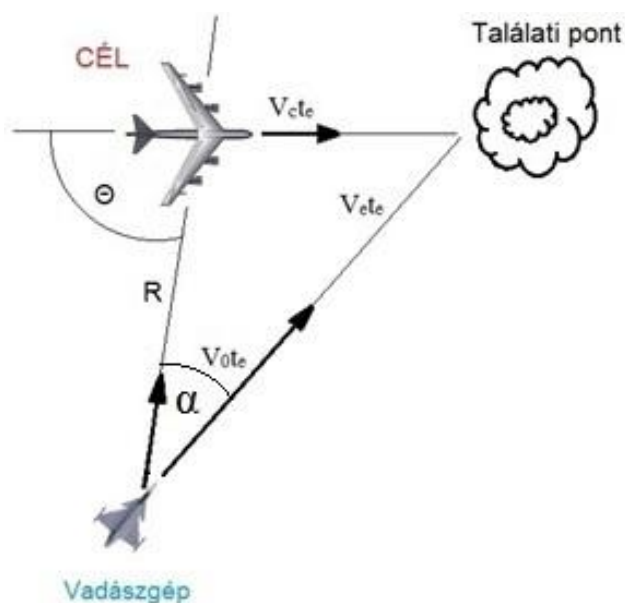
Abban az esetben, ha az ellenséges légi cél manőverezést hajtana végre, annak hatása még mindig kisebb lenne, mint ha ezt a párhuzamos célmegközelítés során végezné. Tehát, a vadászpilóta a célra való rárepülést szabadon választott irányból kezdheti meg anélkül, hogy ez a hatás befolyásolná a pályagörbét. A tetszőleges irány felvétele az esetek többségében kivitelezhető, az képez kivételt, amikor a vadászgép olyan rakétákkal rendelkezik, melyek csak hátsó légtérből indíthatóak és ennek sikeres végrehajtásához az elfogó-vadászgépet hátsó légtérbe kell kivezetni. A minden támadási (elfogási) irányszöggel rendelkező rakétafejezet bevetése során ez a megközelítési módszer a legcél-

ravezetőbb. Ennél is, mint a többi célravezetési módszernél is, meg kell határoznunk a két gép kölcsönös helyzetét, illetve a sebességparaméterek irányát és nagyságát.

Az üldözés menetét figyelembe véve és azt, hogy bizonyos mértékű előretartás esetén mindig számolni kell egy előretartási szöggel, arra a következtetésre jutunk, hogy a kétdimenziós modell egy háromszög alakú pálya lesz. A cél sebességvektorát a következőképpen felbonthatjuk két komponensre. Az egyik legyen merőleges a két gép között meghúzott képzeletbeli célvonalra, a másik pedig ugyanezzel a célvonallal párhuzamos. Ebben az esetben a sebességkomponenseket és az irányokat is szem előtt tartva felírható az alábbi két egyenlet:

$$\frac{dR}{dt} = V_c \cos \theta - V_e \cos \alpha \quad (8)$$

$$R \frac{d\theta}{dt} = -V_c \sin \theta + V_e \sin \alpha \quad (9)$$



10. ábra Vadászgép előretartása¹⁰

Az elfogás menetéből tisztán látszik az, hogy a célvonal, az irányítóvonal és a cél sebességvektora egy háromszöget határoz meg. A háromszögnek az az oldala, mely mentén az üldöző vadászgép halad, $V_e t_e$ és $V_0 t_e$ összegéből áll (10. ábra). Az így megtett út első ciklusa az, amelyet a vadászgép tesz meg annyi idő alatt, míg a lövedék a célba becsapódik. A második útszakasz pedig az, amit a lövedék tesz meg a vadászgép-hez képest ugyanannyi idő alatt.

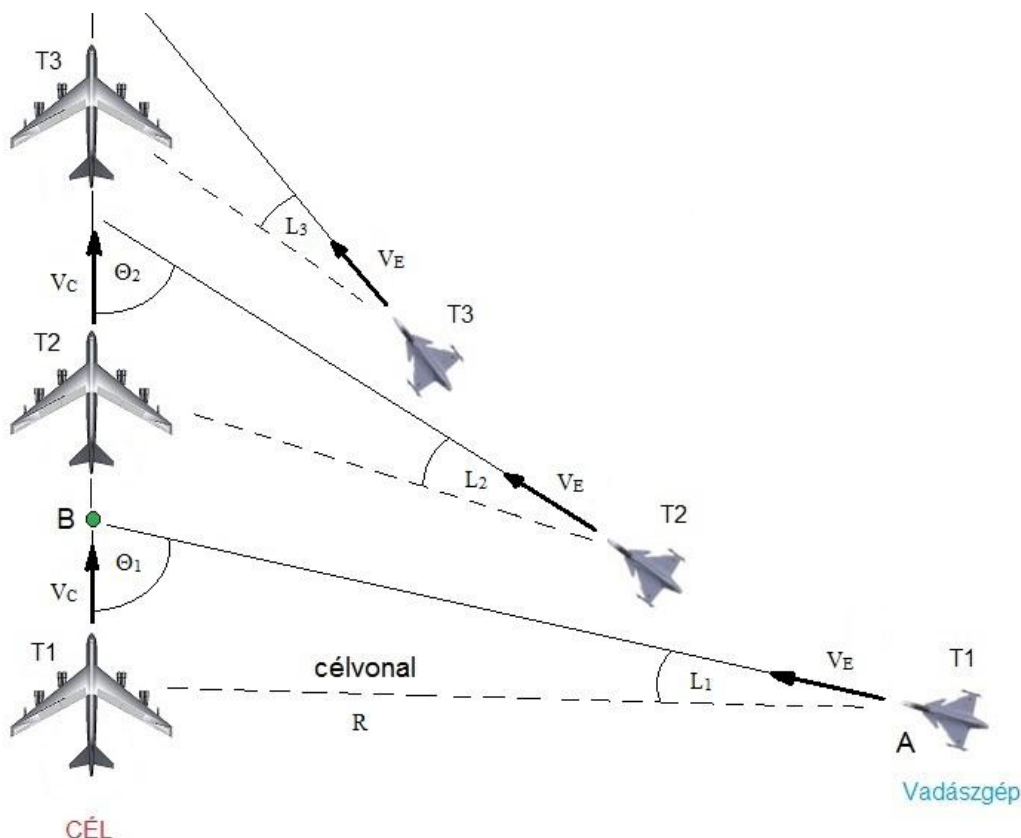
¹⁰ Szerkesztette a szerző (MS Paint)

A 11. ábrán a Földhöz rögzített koordináta rendszerben ábrázolva láthatjuk az előretartásos üldözést a taktikai síkon. Megfigyelhető, hogy a vadászgép haladási iránya minden pillanatban L szöget zár be az irányítóvonallal. Ebben az esetben az elfogó vadászgép fedélzetéről kilőtt lövedéknek az A és B pont közötti távolságot kell megtennie ahhoz, hogy a cél haladási útvonalát keresztesse. Tételezzünk fel egy olyan esetet, amikor az elfogó vadász fedélzeti rakétája egy állandó relatív V_0 sebességgel rendelkezik. A rakéta az R_e távolságot t_e repülési idő alatt teszi meg. Az előbbieken említett geometriai elhelyezkedés miatt megállapítható a következő két összefüggés:

$$R + t_e \frac{dR}{dt} = R_e \cos L \quad (10)$$

$$-t_e R \frac{d\theta}{dt} = R_e \sin L \quad (11)$$

Most hasonlítsuk össze a tiszta és az előretartásos elfogás kiinduló egyenleteit. Azt láthatjuk, hogy az előbbi nem más, mint az előretartásos üldözés egy speciális esete. Ekkor az L előretartási szög és t_e értékek egyenlők nullával [3][4].



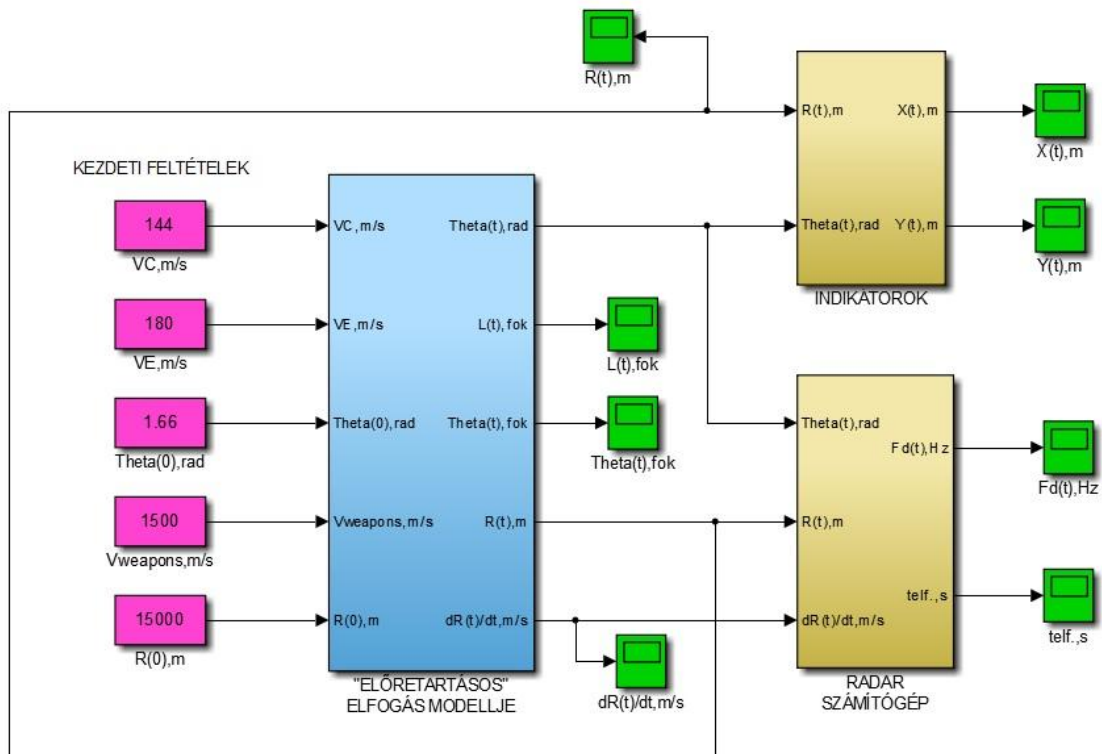
11. ábra Előretartásos módszer Földi koordináta rendszerben¹¹

¹¹ Szerkesztette a szerző (MS Paint)

3.2 A blokkvázlat felépítése

A folyamat további paramétereinek és értékeinek meghatározásához végezzük el a SIMULINK programban a modell felépítését, majd szimuláljuk az esetet (12. ábra). A blokkvázlat alapját a tiszta üldözésnél használt minta fogja biztosítani. A kezdeti feltételekhez további paraméterek csatlakoznak úgy, mint a vadászpilóta fedélzetéről indított rakéta $V_{weapons}$ kezdősebessége. Más részről az egybeépített blokkok struktúrái is plusz egységekkel egészülnek ki. Így a kezdeti paraméterek listája a soron következők fog megfelelni.

- $V_c = 144$ m/s
- $V_e = 180$ m/s
- $\theta_0 = 1,66$ rad (95°)
- $R_0 = 15000$ m
- $V_{weapons} = 1500$ m/s

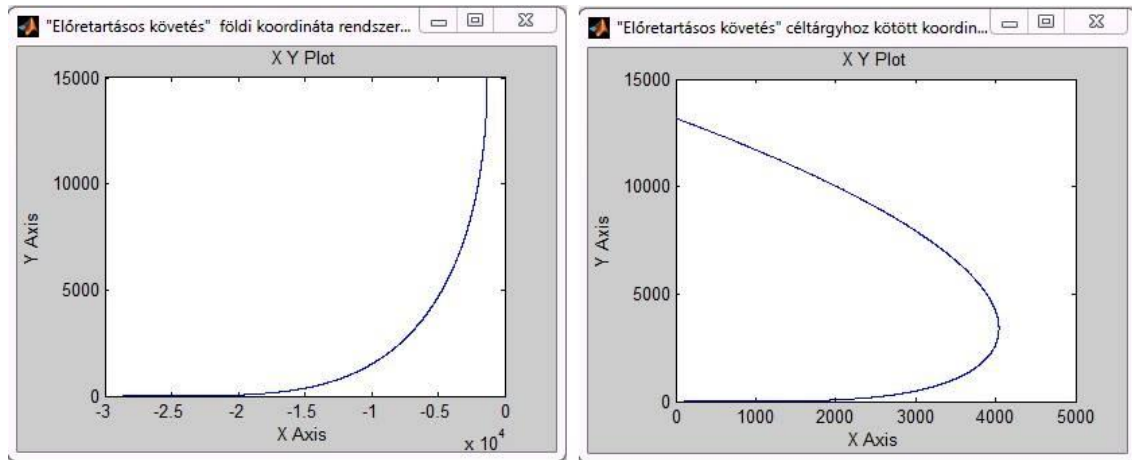


12. ábra Előretartásos elfogás blokkvázlata¹²

Magáról a rendszerről számos információt megtudhatunk, melyek az oszcilloszkópok segítségével tekinthetők meg. Elsősorban legfontosabbak a céltávolság, az előretartási szög, a Doppler frekvencia, a Théta szög időbeni változása, valamint az el-

¹² Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

Az elfogás imitálása a megadott paraméterek alapján történik meg. A folyamat befejeztével a program automatikusan kirajzolja számunkra a vadászgép repülési pályáját Földhöz, valamint célhoz rögzített koordináta rendszerben (14. ábra).



14. ábra Az elfogás dinamikája a Földhöz, illetve a célhoz kötött koordináta rendszerben¹⁴

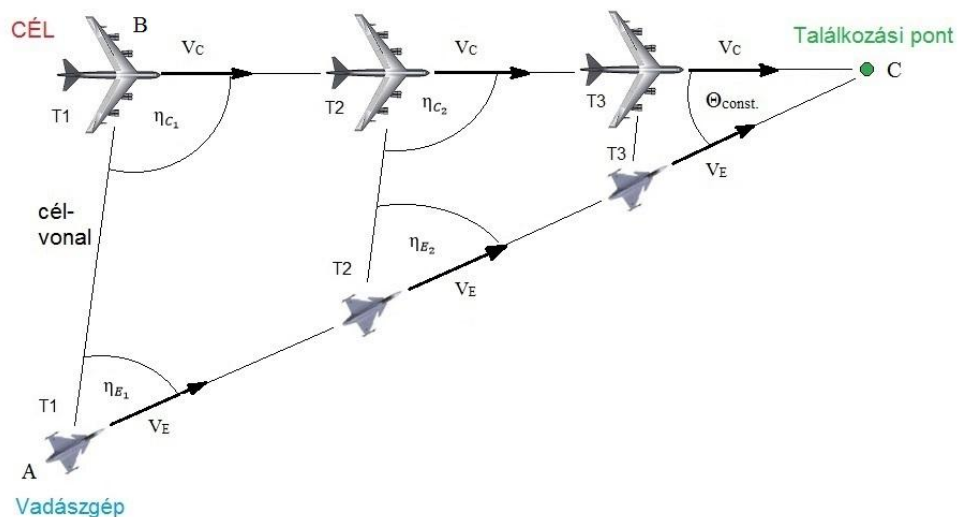
Az előretartás 5 fokról indul és a szimuláció végeztével nullában végződik. A magyarázat egyszerű. A vadászgép által leírt pálya egy görbe, tehát a szög értékek nem lineárisan fognak változni. Az előretartás változása azonban így is egyenletesnek mondható. Az üldöző a manőver befejeztével fokozatosan berepül a cél mögé, így előretartásra nem lesz szükség [4].

¹⁴ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

4. PÁRHUZAMOS ELFOGÁSI MÓDSZER

Abban az esetben, ha a légi cél egyenes vonalú egyenletes mozgással halad, tehát a következő feltételeknek eleget tesz az, hogy $V_c = \text{konstans}$, $\omega_c = 0$, akkor a vadászgép V_E sebessége is állandó marad. A vadászgép repülési irányát meghatározhatjuk úgy, hogy a megközelítési folyamat során, egyenes vonalon egyenletes mozgással halad cél felé és adott pillanatban, adott C pontban találkozik (15. sz. ábra). A feltételezett találkozás csak abban az esetben történik meg, ha az $V_{megköz}$ megközelítési sebességvektor iránya áthalad a légi célon. Ezen felül szükséges feltétel, a sebességek állandósága mellett, η_c és η_E célzási szögek állandósága.

A 15. ábrán az látható, hogy a vadászrepülőgép repülési irányának, illetve a találkozási pont megállapítása céljából, az A pontból meg kell húzni az elfogó-vadászgép útvonalát V_E sebességvektora mentén a célgép útvonalának metszéséig.



15. ábra Párhuzamos elfogás Földi koordináta rendszerben¹⁵

Az A és C pontot összekötő szakaszon repülő vadászgép esetén a különböző célzási szögek konstansok maradnak.

$$\eta_{c_0} = \eta_{c_1} = \dots = \eta_{c_i} \quad \text{és} \quad \eta = \eta_{v_1} = \dots = \eta_{v_i}$$

Eközben az AB céltávolság egész idő alatt önmagával párhuzamosan halad, ezért nevezzük ezt a módszert párhuzamos megközelítési módszernek.

Ha ismerjük a két repülőgép mozgásának sebességét, valamint a vadászgép irány-szögét, a vadászgép célra történő η_c célzási szöge megállapítható. A fenti ábrán látható ABC háromszögből szinusz tétel alapján felírhatjuk a következő összefüggéseket.

¹⁵ Szerkesztette a szerző (MS Paint)

$$\frac{\sin \eta_c}{V_c t} = \frac{\sin \eta_E}{V_E t}; \quad (12)$$

$$\sin \eta_c = -\frac{V_c}{V_E} \sin \eta_E \quad (13)$$

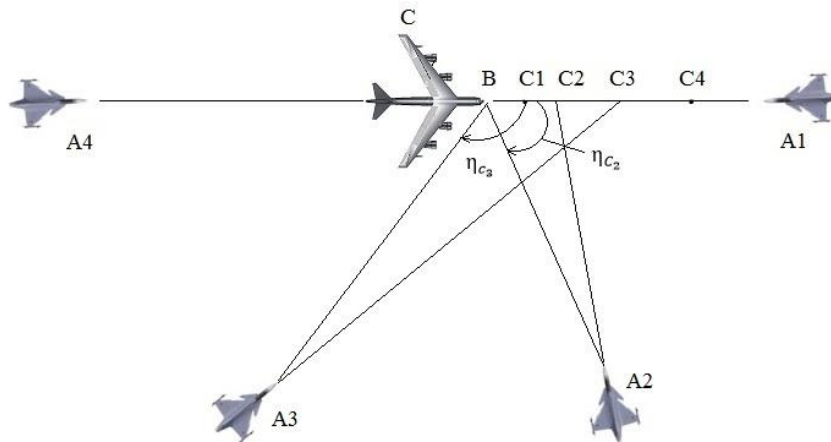
Következő lépésként jelöljük az $\frac{V_E}{V_C}$ értéket m -el. Ebben az esetben a célra történő célzási szög értékének megállapítására a következő egyenletet kapjuk:

$$\sin \eta_c = -\frac{1}{m} \sin \eta_E \quad (14)$$

Az egyenlet egy lényeges kinematikai összefüggés, amely a párhuzamos megközelítési módszert alapvetően jellemzi. Az összefüggés arról ad nélkülözhetetlen információkat, hogy függetlenül a célgép és a vadászgép közötti távolságtól, az elfogónak folyamatosan a találkozási pontba kell tartania és mindeközben a célzási szög állandó marad, ami a vadászgép sebességét és irányszögét is meghatározza [3].

4.1 Lehetséges párhuzamos megközelítések

A légi cél és az üldöző vadászgép kezdeti helyzetétől függően az adott eljárással végrehajtott rávezetés esetén bezárt szögük lehet hegyes, derék vagy akár tompaszög is. Tehát a vadászrepülőgép a kiszámított találkozási pont felé tetszőleges irányszögön is repülhet, akár céllal megegyező irányszögön is. A megközelítési módszer lényege az, hogy a földről kapott repülési irány olyan legyen, amely az állandó sebességgel haladó gép esetén is minden időpillanatban a célgéppel bezárt célzási szöge állandó maradjon. Így a légi céllal a meghatározott C pontban találkozni fog (16. ábra).



16. ábra A vadászgép lehetséges helyzetei a célhoz viszonyítva¹⁶

¹⁶ Szerkesztette a szerző (MS Paint)

Az elfogás lényege természetesen az, hogy a légi cél folyamatosan egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. Megtörténhet az, hogy a célgép irányt és repülési sebességet változtat. Ebben az esetben a vadászgép kénytelen válaszmanővert végrehajtani, következésképpen mozgási túlterhelést és szöggyorsulást kiváltva. Ráadásul a légi cél manőverének befejeztével a találkozási pont helyzete is megváltozik. A nagymértékű módosulás olyan mértékűvé is válhat, amely kizárja azt az esetet, hogy a találkozás lehetősége bekövetkezzen [3].

4.2 Célrávezetés lehetőségei nagyobb sebességű légi célra

Az általános ismertetés során érdemes figyelembe venni azt az esetet is, amikor a megközelítendő légi cél sebesség értéke nagyobb, mint az őt követő vadászgépé. Márpedig a való életben előfordulhatnak olyan körülmények is, amikor a célrávezetést ilyen feltételek mellett kell végrehajtani.

Tehát akkor, ha az elfogó vadászgép lassabb, mint a légi cél, ráadásul azt a cél háta mögül kell megközelítenie, az elfogás sohasem következhet be. Így csak az a megoldás jöhet szóba, ha az vadászgép az elfogást oldalirányból, vagy esetleg szemből kezdi meg. Ilyen esetekben, habár a sebessége még mindig kisebb, mint a célé, közeledni fog [3].

4.3 Párhuzamos megközelítési módszer minősítése

Mivel a megközelítés pályája a teljes végrehajtás időtartama alatt egyenes vonalú, ezért az elfogásra szánt idő a lehető legkisebb lesz. Az egyenes vonalú repülési pályából arra lehet következtetni, hogy a repülési irány állandó különösebb gépbedöntések nincsenek, tehát a pilótának igen egyszerű dolga van. A légi célra történő rárepülése közben a vadászgép folyamatos, konstans célzási szögön van. Ebből az következik, hogy az elfogó célfelderítése tudatos, célirányos. Azokban az esetekben, amelyekben a légi cél manővert hajt végre, a vadászgép válaszmanővere közben fellépő túlterhelések nem haladhatják meg a célgép manőverénél jelentkezőket. Ha a vadászpilóta képes tartani a megfelelő irányszöget, akkor a találkozási pont eltolódása nem lesz jelentős.

Fontos megjegyezni azt, hogy a párhuzamos megközelítés módszerét olyan esetekben is alkalmazzák, amikor a célgép sebessége nagyobb, mint a vadászgépé. Az üldöző szabadon választott irányból közelítheti meg légi célt, hiszen mindkettőjük relatív kiindulási helyzete tetszőleges is lehet. Azonban már nem célszerű alkalmazni abban az esetben, amikor is a vadászgépet a légi cél körzetében vezetjük ki a támadáshoz előnyös pozícióba. Tehát ha a célra való rárepülés találkozó irányszögön, vagy a találkozási pontot keresztező irányszögön viszonylag nagy sebességgel játszódik le, akkor az elfogónak valamilyen meg-

határozott időben olyan manővert kell végrehajtania, amivel a lehetséges ütközést elkerüli. Ezzel egy időben pedig a mereven beépített tűzfegyverét úgy kell irányoznia, hogy azzal a lehető leghamarabb a célt leküzdje. Következtetésképpen a párhuzamos rávezetési módszer az olyan hagyományos fegyverzettel rendelkező vadászgépek számára csak akkor előnyös, ha az valamilyen oknál fogva be tud kerülni az ellenséges légi cél hátsó légterébe, illetve ha az eredetileg is oda lett kivezetve.

A megközelítést legcélszerűbb abban az esetben alkalmazni, ha a két gép közötti távolság meglehetősen nagy, hiszen csak ezzel a módszerrel lehet a megközelítést végrehajtani, majd a célrávezetést tovább folytatni.

Természetesen napjainkban a korszerű negyedik és ötödik generációs vadászpülőgépek már nem csak hagyományos fegyverzettel rendelkeznek, figyelembe kell venni az irányítható és nem irányítható rakéták alkalmazásának lehetőségeit is. Ezen repülőgépek számára a párhuzamos megközelítés az egyik legalapvetőbb célrávezetési módszer. A rávezetést legjobban akkor lehet használni, amikor azt manőverező légi célra kell végrehajtani. Kulcsfontosságú feltétel, hogy nem elegendő csak a repülőgépek koordinátáinak ismerete, a sebességparaméterek értékeivel is tisztában kell lennünk a végrehajtás során [3].

4.4 A blokkvázlat felépítése

Az általános ismeretektől függetlenül, én olyan eseteket szimuláltam, melyeknek kezdeti feltételeit magam választottam meg, tehát az elfogás kezdetekor a vadászgép adott célzási szöggel indul, ami egyben pozícióját is meghatározza.

Elemzések és vizsgálatok alapján a párhuzamos elfogásra a következő két differenciálegyenlet írható fel:

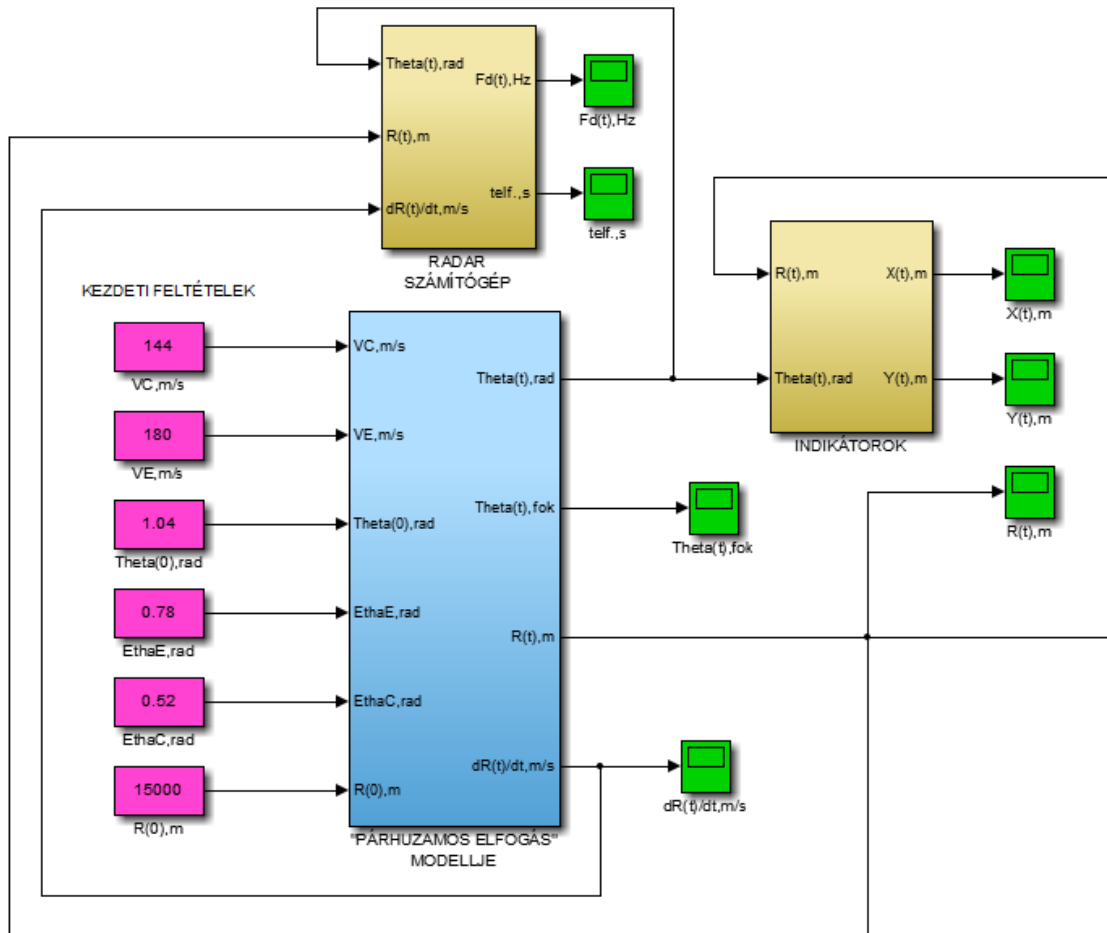
$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{V_E \sin(\theta - \eta_E) - V_C \sin(\theta - \eta_C)}{R(t)} \quad (15)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = V_C \cos(\theta - \eta_C) - V_E \cos(\theta - \eta_E) \quad (16)$$

Ezek alapján a SIMULINK programból kiválasztott megfelelő blokkok segítségével a 17. ábrán látható blokkvázlat felépíthető. A párhuzamos elfogáshoz megválasztott kezdeti feltételek a következőképpen alakulnak:

- $V_C = 144 \text{ m/s}$

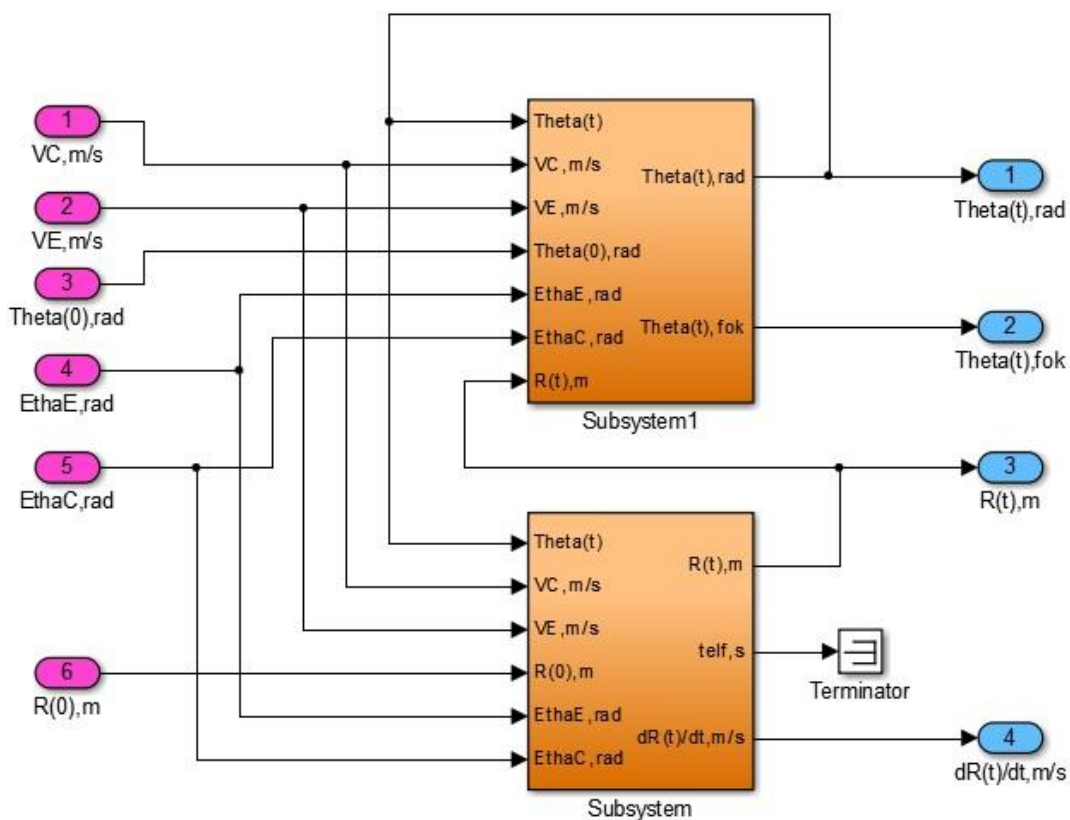
- $V_E = 180 \text{ m/s}$
- $\Theta_0 = 1,04 \text{ rad } (60^\circ)$
- $\eta_E (\text{EthaE}) = 0,78 \text{ rad } (45^\circ)$
- $\eta_C (\text{EthaC}) = 0,52 \text{ rad } (30^\circ)$
- $R_0 = 15000 \text{ m}$



17. ábra Párhuzamos elfogás blokkvázlata¹⁷

A SIMULINK program által felépített párhuzamos elfogás modelljének struktúrája a korábbiakhoz hasonlóan alakul. Szembetűnő változást vehetünk észre a kezdeti feltételek számait tekintve. Két új szögérték is megjelenik a megközelítéshez szükséges hálózat megalkotása során, mégpedig az EthaE és EthaC. Az EthaE radiánban vett szög megegyezik azzal az értékkel, amelyet a vadászgép sebességvektora, illetve a céltávolság zár közre. Hasonlóképpen az EthaC pedig a légi cél és a céltávolság által bezárt szöget jelenti. A további paraméterek megjelenésével a párhuzamos modellt felépítő két alrendszer bonyolultabbá válik (18. ábra).

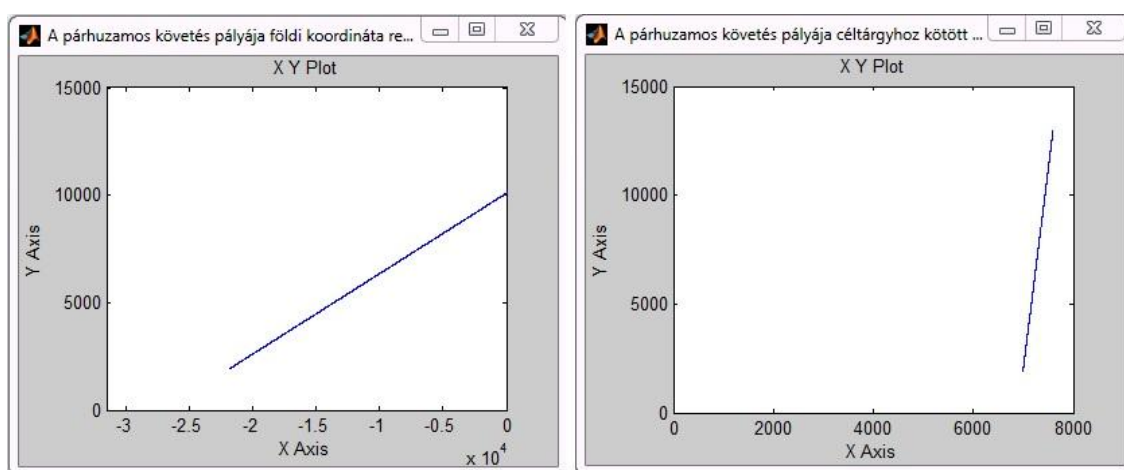
¹⁷ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)



18. ábra Párhuzamos elfogás modelljének kibontása¹⁸

A céltávolság, a légi cél és a vadászgép sebességvektora által meghatározott háromszög kiegészítő szögei a szimuláció során állandóak maradnak. Ez annak köszönhető, hogy az eddigi elfogások alkalmával időben változó θ célzási szög most állandó értéket vesz fel.

Az értékek felvételével, majd a szimuláció lefuttatásával megkapjuk a Földhöz és a célhoz rögzített koordinátarendszerekben kirajzolódó elfogási pályákat (19. ábra).



19. ábra Az elfogás dinamikája a célhoz, illetve a Földhöz kötött koordináta rendszerben¹⁹

¹⁸ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

¹⁹ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

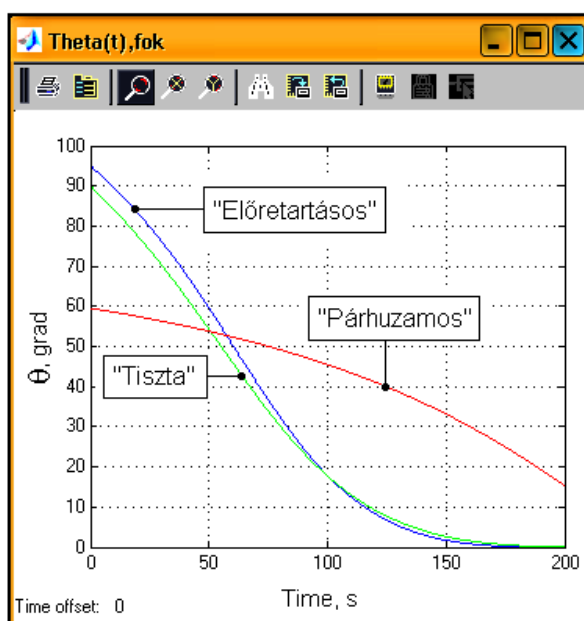
5. A CÉLRÁVEZETÉSI MÓDSZEREK ÖSSZEHA-SONLÍTÁSA

A vadászgép-rávezetések ismertetését és a felírt modellek elemzését követően összehasonlítom a három megközelítési módszer során változó fontosabb paramétereket. Az elemzés elvégzésekor felhasználandó értékek a következők:

1. a vadászrepülőgép szemszögéből vett Θ célzási szögérték fokban megadva;
2. a légi cél és a vadászgép közötti céltávolság mértékének változása ($R(t)$);
3. az elfogáshoz szükséges idő (t_{elf});
4. a rárepülés ideje alatt változó megközelítési sebesség ($\frac{dR(t)}{dt}$);
5. a két repülőgép közötti távolság csökkenéséből adódó Doppler-frekvencia változása ($F_d(t)$).

Az értékek változása mind az idő függvényében történik. A megjelölt öt paraméter igen jól tükrözi a módszerek közötti differenciákat, ezért választottam ezek részletesebb áttekintését.

5.1 Théta, célzási szög



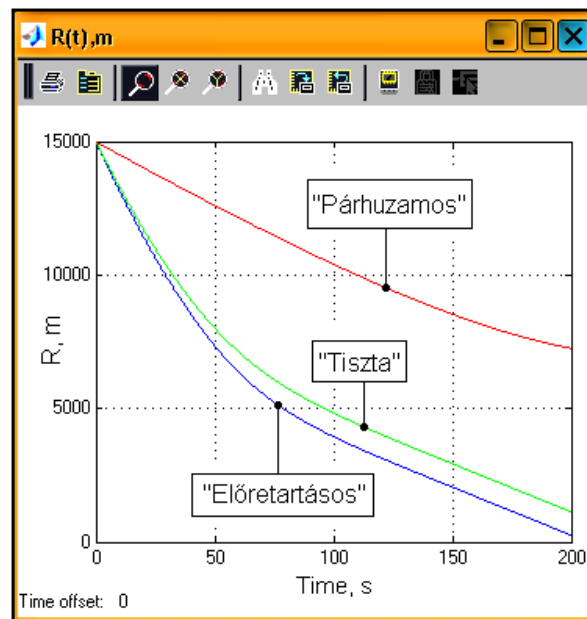
20. ábra Célzási szög változása²⁰

Első jellemzőként ismertetem a vadászgép szemszögéből a célzási szög változását, pontosabban annak csökkenését. A szögérték mérséklődése a légi cél és a vadászgép között lévő céltávolság csökkenése miatt következik be. A tiszta és előretartásos rávezetés közel egyforma szögértékről, 90 és 95 fokról indulnak, a párhuzamos ugyanakkor 60-ról. A grafikonon látható, hogy a tiszta és előretartásos elfogásoknál tapasztalt változások közel azonosak,

²⁰ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

a két görbe szinte egy vonalon helyezkedik el. Ezzel szemben a párhuzamos megközelítés sajátosságaiból fakadóan, az előző két, meredeken csökkenő függvénnyel ellentétben annak változása sokkal lassabb. Ebből arra következtethetünk, hogy a tiszta és az előretartásos elfogás dinamikájában és gyorsaságában is felülmúlja a harmadik módszert. Az előbbi két elfogáshoz rendelt görbék már a nulla értéket is elérték, hozzávetőlegesen a 150-től a 200 másodpercig vett időintervallumban, amíg a párhuzamos elfogás során tapasztalt célzási szög ugyanebben a ciklusban körülbelül 25 fokértéknél tart.

5.2 Céltávolság időbeni változása

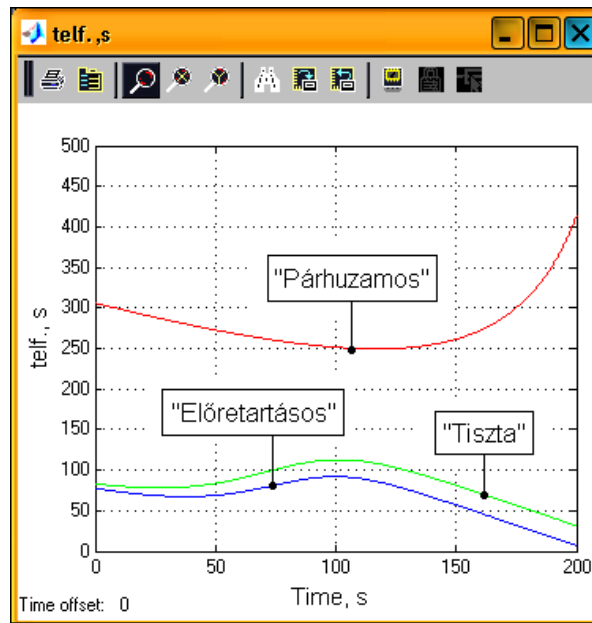


21. ábra Céltávolság változása²¹

A soron következő változó, a céltávolság csökkenése ismét a megközelítési módszerek dinamizmusaira enged következtetni. Az előző értéktől ellentétben, a kiindulási paraméterek megegyeznek, a távolságok egységesen 15000 méter hosszúak. A tiszta és előretartásos elfogás esetében a θ szög éles változása miatt megállapítható, hogy a vadászgép pilótájának alkalmanként meredek bedöntéseket kell végrehajtania a célon maradás érdekében. Ezzel egy időben a céltávolság is nagyobb mértékben fog csökkeni az előző két módszer esetében. A két célravezetés közötti hasonlóság ezen a grafikonon is szembevetendő. A céltávolság változási gyorsasága a tiszta elfogás technikája során nem sokkal marad le az előretartásostól. A párhuzamos elfogás görbéjének változása közel lineárisnak mondható. Ezt a megközelítési módszert megint nem sorolhatjuk a dinamikus technikák közé, természetesen célja sem egyezik meg az előző kettőével.

²¹ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

5.3 Elfogási idő



22. ábra Elfogási idő változása²²

A különböző paraméterek vizsgálata alapján, a legfontosabb tényezőnek az elfogás során eltelt időt választottam. Azért is vehetjük a legmeghatározóbbnak, mert a légi harcok sikeressége ettől az értéktől függ a leginkább. Ha a felderített célról egyértelműen megállapítható, hogy a légtérbe fenyegető szándékkal lépett be, az elfogás végrehajtása annál jobb, minél gyorsabban és minél rövidebb idő alatt történik meg. Ezt a szempontot szem előtt tartva a tiszta és az előretartásos elfogás módszer kivitelezése a legalkalmasabb. A SIMULINK program az elfogás kezdetétől fogva számítja az időt. Az érték a pillanatnyi sebesség, távolság és pályairány függvényében változik, és jellemzi az ellenséges légi cél teljes elfogásához szükséges időt. A céltávolság induló értéke mind a három esetben azonos, ezért azt gondolhatnánk, hogy nulla időpillanatban az elfogási idők értékei is azonosak.

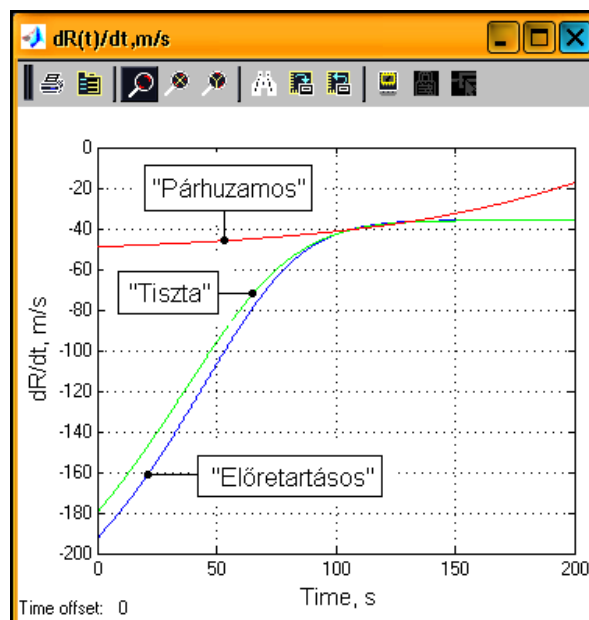
Azonban a célzási szögek eltérő értékei és a pályairányok tulajdonságai miatt a tiszta és az előretartásos elfogásnál az elfogási idő hozzávetőlegesen 75 és 80 másodperces értékről indul. Az alapból 300 másodpercről induló párhuzamos megközelítés a 60 fokos célzási szög miatt alakul így.

A grafikonon ábrázolt görbék menetéből kifolyólag három részre bonthatjuk azokat. Az első fázis monoton csökkenése a céltávolság folyamatos mérséklődéséből adódik, ami egyértelmű, hiszen itt a vadászgép sebességvektora a cél irányába vagy adott szögértékkel a cél elé mutat. A második ciklusban a tiszta és előretartásos módsze-

²² Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

rek elfogási idejének mértéke lassan növekedni kezd. Ez a változás annak köszönhető, hogy a nagyobb sebességgel rendelkező vadászgép megkezdte a légi cél mögé való ráfordulást, ezért a köztük lévő távolság megnövekszik és ennek következményeként a pillanatnyi elfogási idő is. Ezzel egy időben a párhuzamos elfogásra jellemző elfogási idő nem változik, mert ekkor a vadászgép mindvégig egyenes vonalú pályán halad. A harmadik szakaszban az elfogó-vadászgép már azon a pályán fog haladni, amelyen a légi cél, így a célzási szög is nulla lesz. Ezek hatására ismét csökkenni kezd az elfogási idő és értéke nullához fog tartani. Elérni nem fogja, hiszen az összeütközést meg kell akadályozni.

5.4 Megközelítési sebesség



23. ábra Megközelítési sebesség változása²³

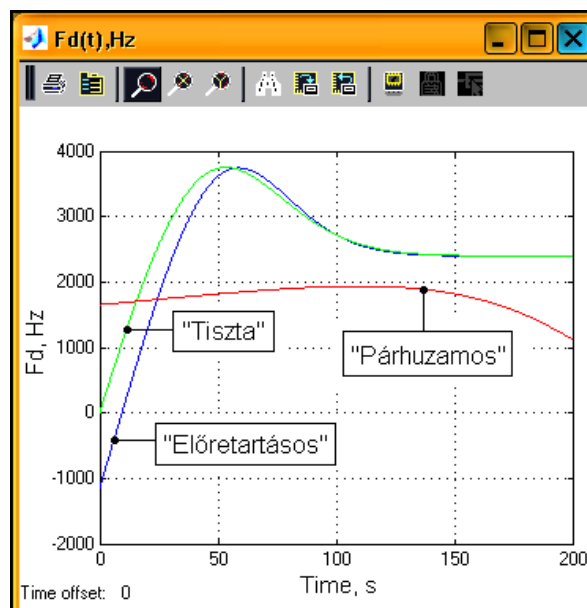
A célrávezetések alkalmával célszerű tudnunk azt, hogy a pillanatnyi megközelítési sebesség milyen nagyságú. Kulcsfontosságú tényezőként vehetjük számításba szerepét. Folyamatosan információkat kell kapnunk a vadászgép aktuális sebességéről. Ha esetleg a túl nagy sebességgel közelíti meg az ellenséges célgépet és pozíciójáról csak adott idő elteltével értesülünk, a pilótának esetlegesen élesen változtatnia kell irányán és sebességén, veszélyeztetve az elfogás sikerét. Jelentősen alacsony sebességen pedig a légi cél megközelítése igen tetemes időt ölölhet fel, legrosszabb esetben utol sem éri. A tiszta és előretartásos célrávezetési módszerek végrehajtása során a kiindulási megközelítési sebesség igen nagy, 180 és 190 m/s-s nagysággal rendelkeznek. A gépek közötti távolság

²³ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

csökkenésével a célhoz szükséges megközelítési sebesség nagysága is csökkenni fog addig, amíg a vadászgép a célgép mögé befordul. Ezt követően egy állandó, a grafikonról is leolvasható, jóformán 38 m/s értékkel fog haladni. A két elfogási eljárás hasonlóságai itt is igen szembetűnőek.

Ugyanakkor a párhuzamos elfogásnál kimagaslóan éles változások nem következnek be. A megközelítési sebesség értéke majdnem lineárisan változik, a kezdő 50 m/s-s érték fokozatos, monoton csökkenő.

5.5 Doppler-frekvenciaváltozás



24. ábra Doppler-frekvencia változása²⁴

Végül az ötödik vizsgált szempontot, a kisugárzott és a visszavert jelek közötti frekvenciaeltolódást szemléltetem. Radaros nézőpontból igen fontos. Ez alapján mérhető elsősorban a megfigyelt légi cél sebessége, másodsorban a gépek közötti távolság nagysága. A korábbi paraméterekhez hasonlóan itt is az a helyzet áll fenn, hogy a tiszta és az előretartásos megközelítéshez tartozó függvények nagyon hasonlóak. A kiinduló értékük kis mértékben különbözőek, de a görbék karakterisztikái, azok felfutásai és maximum pontjaik igen közel helyezkednek el egymáshoz. Monoton csökkenésük és körülbelül 2400 Hz-es frekvenciaváltozásra beálló értékük is jól megfigyelhetők. Ismét párhuzam vonható a függvények menete és a hozzájuk tartozó elfogások pályái között. A két meredeken felfutó célrávezetést ábrázoló függvények első szakasza azzal jellemezhető, hogy a vadászgép a cél mögé való ráfordulást végzi. Így valamilyen szinten távolodik a légi céltől, ezért a Doppler-eltolódás is

²⁴ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

megnövekszik. A maximum ponton a növekedés megáll és csökkenni kezd, tehát az elfogó-vadász folyamatosan közeledik a célhoz. Az előbb említett állandó frekvencia annak köszönhető, hogy a vadászgép és a légi cél közötti megközelítési sebesség nem változik. A párhuzamos elfogást végrehajtó vadászgéphez kapcsolt Doppler-frekvenciaváltozás görbéje közel lineáris. Az egyenes vonalon való rárepülés adottságainak köszönhetően hatalmas változásokkal nem kell számolnunk.

5.6 Az összehasonlítások összegzése

A szimuláció szempontjából legfontosabbnak vélt paraméterek összehasonlítását követően egyértelmű következtetések vonhatóak le. A 200 másodperc időtartamra beállított szimulációk azt bizonyították, hogy a kezdeti feltételek függvényében végzett elfogások meglepő eredményeket produkálnak. Az első kettő, tiszta és előretartásos megközelítésknél tapasztalt értékek közel ugyanazok, mindenesetre nagyon hasonlóak. Ezek a hasonlóságok köszönhetőek annak is, hogy a kezdeti feltételek nagy része megegyezik. Ebből kifolyólag pályájuk és irányuk is.

Az előbbi két célrávezetésről azt lehet mondani, hogy hatékonyságban és dinamikában is jelentősen meghaladja a párhuzamos megközelítési technikát. Az általuk produkált eredmények, mind elfogási idő és megközelítési sebesség terén igen meggyőzőnek bizonyultak. Valamennyi szempont alapján megegyeznek az egyes időpillanatban felvett értékek. Gyors és minél hatékonyabb elfogás szempontjából a két módszer kiválóan alkalmazható, az ellenséges légi cél elfogása viszonylagosan rövid idő alatt megtörténik.

Ezzel szemben a párhuzamos megközelítési módszer az imént említett feltételek mellett nem képes elfogást így végrehajtani. Az elfogási idő és a megközelítési sebesség is viszonylag lineáris, de semmiképp sem hirtelen változó. Az elfogás feladata és tulajdonságai nem a dinamikus megközelítést jellemzik. Annál is inkább a sokkal nagyobb távolságból történő rárepülés esetén alkalmazandó.

6. VADÁSZGÉP ÉS PILÓTA

A továbbiakban azt szemléltetem, hogy egy-egy elfogás végrehajtásának alkalmával mi minden játszik szerepet. Illetve, hogy a repülőgép pilótája és az általa kezelt tűzirányító rendszer miképp dolgozza fel a kapott jeleket, miként változnak a kezdeti feltételek az egyes időpillanatokban.

A célrávezetés folyamata és az ellenséges vagy nem azonosított légi cél megközelítése akkor veszi kezdetét, amikor a földi harcálláspont parancsot ad annak rárepülésére és felderítésére. Következő mozzanatként megkezdődik a cél megközelítése. Mikor az elfogó vadászgép radarantennája is képes érzékelni a célt, a radar különböző paramétereket fog mérni. Ezek lehetnek az elfogó és a cél közötti távolságok, a cél sebessége, a két sebességvektor által bezárt síkszögek, helyszögek, s ezeknek változási gyorsaságai. Mindezen kezdeti feltételeket a radar érzékeli és továbbítja a fedélzeti számítógépre. Korszerű, negyedik illetve ötödik generációs vadászgépeken ezek az adatok az úgynevezett homloküveg indikátoron (HUD²⁵-n) is megjelennek, megkönnyítve a pilóta számára a harci feladat végrehajtását. A HUD -n keresztül a pilóta megkapja az információkat, majd a rá jellemző átviteli függvényekkel és késéssel feldolgozza, illetve korrigálja, ha szükséges, vagy pályán tartja a vadászgépet a megfelelő paraméterek mellett. A vadászpilóták esetében léteznek olyan bizonyos átviteli függvények, melyek rá jellemző értékekkel bírnak. Ezt repülő orvosok számították ki és határozták meg laboratóriumi körülmények között, pont olyan esetek szimulálására is, mint amely a jelenlegi témát is érinti. Így előrevezethetőek különböző esetek annak függvényében, hogy a „pilóta értékek” hogyan változnak, illetve a repülőgép-vezető a külső jelekre milyen válaszreakciót küld a kezelőszervekre. A repülőgép-vezető jelfeldolgozási sebességét a külső zavaró tényezők is befolyásolhatják. Ekkor figyelembe kell venni a rá ható túlterhelés nagyságát, a fáradtság mértékét is. Nagyobb mértékű túlterhelés esetén a repülőgép-vezető reakcióideje a normál értéktől eltérően jelentősen meghosszabbodhat. Az 1. számú melléklet ábráján megfigyelhető a Doppler-radar antenna vezérlésére felírt blokkvázlat és az ide beérkező adatok is. Az antenna vezérlése egy szögmegkövető hajtás, amely a radar antenna negatív visszacsatolása révén a beérkező jelek alapján számítja ki az antenna állásának új szögértékét. Ezt követően a szervomotor a megfelelő irányba elforgatja. Ahhoz, hogy az elforgatás minél egyenletesebb és simább legyen, reduktor beépítése is szükséges. Az újabb és újabb szöghelyesbítések pillanatok alatt lejátszód-

²⁵ HUD – Head Up Display – homloküveg indikátor

nak. Ez lényeges szempont, hiszen az radarantennának minden egyes időpillanatban a cél helyzetét kell mérnie.

6.1 A Doppler-radar mérési elve

Ha a fedélzeti radar kisugárzott frekvenciája állandó, a távolodó vagy közeledő célról visszavert jel frekvenciája a fázisváltozásból adódóan:

$$\omega_V = \frac{d\varphi_V}{dt} \quad (17)$$

A φ_V -visszavert jel fázisa ugyanakkor a kisugárzott φ_K -fázistól és a sajátgép-célgép közti távolság φ -fáziskésésétől függ.

Mivel $\varphi_K = \omega_K t$ és $\varphi = \omega_K t_D = \omega_K \frac{2D}{c}$, ahol t_D -a sajátgép-célgép távolságától függő időkéés, D-céltávolság, így:

$$\varphi_V = \varphi_K - \varphi = \omega_K t - \omega_K t_D = \omega_K \left(t - \frac{2D}{c} \right) \quad (18)$$

Ebből a visszavert jel frekvenciája:

$$\omega_V = \frac{d\varphi_V}{dt} = \omega_K \frac{d}{dt} \left(t - \frac{2D}{c} \right) = \omega_K \frac{d}{dt} t - \omega_K \frac{2}{c} \frac{dD}{dt} = \omega_K \left(1 - \frac{2}{c} v_C \right) \quad (19)$$

ahol $\frac{dD}{dt} = \pm v_C$

Mivel $\omega = 2\pi f$, így végezetül: $f_V = f_K \left(1 \pm \frac{2}{c} v_C \right)$

A megközelítési, illetve a távolodási sebesség mérését a radar a kisugárzott és visszavert jel frekvenciájának különbségével, a **Doppler-frekvenciával** detektálja:

$$F_D = f_K - f_V = f_K - f_K \left(1 \pm \frac{2}{c} v_C \right) = \pm \frac{2}{c} f_K v_C = \pm \frac{2v_C}{\lambda} \quad (20)$$

A Doppler-frekvencia többnyire a hangfrekvenciás tartományba esik:

Pl.: ha $f_K = 1$ GHz ($\lambda = 30$ cm), és a cél sebessége: $V_C = 556$ m/s, akkor $F_D = 3700$ Hz

Minél magasabb a kisugárzott jel frekvenciája, annál jobban detektálható a kis sebességű cél. Ha $f_K = 10$ GHz, akkor:

v_c	556	277	222	166	111	55	27	[m/s]
v_c	2000	1000	800	600	400	200	100	[km/h]
F_D	37000	18466	14800	11066	7400	3666	1800	[Hz]

6.1.1 A Doppler-radar üzemmódjait meghatározó összefüggések

Az egyértékű detektált sebesség:

$$V_{MAX} = \frac{PRF \times \lambda}{4} \quad (21)$$

ahol PRF (Pulse Repetition Frequency), Impulzus Ismétlődési Frekvencia.

Az egyértékű detektált céltávolság:

$$D_{MAX} = \frac{c}{2 \times PRF} \quad (22)$$

Az előző két összefüggés kombinációjával:

$$V_{MAX} D_{MAX} = \frac{c\lambda}{8} \quad (23)$$

A mozgó objektum tényleges sebessége és radiális sebessége közötti kapcsolat:

$$v_r = v_c \cos \theta \quad (24)$$

ahol, θ a sebességvektor és radartól a célpontig mutató irányvektor által bezárt szög. Ha ez 90° , akkor a radiális sebesség nulla, így a Doppler radar nem mér frekvencia eltolódást.

6.2 Vadászgép és pilóta komplex blokkvázlata

Az 1. számú melléklet ábráján azt figyelhetjük meg, hogy a beérkező paraméterek, a vadászgép és az egész rendszert vezérlő pilóta milyen kapcsolatban állnak egymással. A felépített blokkvázlat első ránézésre bonyolultnak tűnhet. A különböző állapotterez egyenletek és az alrendszerek közötti összefüggések magyarázatra szorulnak.

Legelső lépésként érdemes megvizsgálni a rendszert alkotó elemeket. Kezdeképpen és a logikai sorrendet szem előtt tartva, megfigyelhetjük a „Radar Input” blokkot. Az ideérkező, radar által észlelt különböző paraméterek feldolgozásra kerülnek.

A radar által érzékelt előretartási szög, céltávolság és megközelítési sebesség értékei bekerülnek a következő „Antennavezérlés” modulba. Itt megtörténik a radarantenna

szögének módosítása. A szervomotor adott erősítési tényezővel rendelkező elektromos jelet kap, amely alapján a radarantennát elforgatja. A szögműködtetést fenntartva az antenna redukora alakítja át az elfordulást. Néhány hatásvázlat esetében találhatunk úgynevezett fehér zajt generáló blokkot is. Ez azért került beépítésre, hiszen semmilyen rendszer nem mentes a külső zavarásoktól, így ezek szemléltetése ilyen módon oldható meg.

Más részről, a radarantenna által észlelt paraméterek a megjelennek a repülőgép-vezető fülkében található homloküveg indikátoron is. Ez utóbbit a „Radar információk” részlegben láthatjuk.

A procedura következő lépéseként a homloküveg indikátorról leolvasott információkat feldolgozó pilóta átviteli függvénye következik. A korábbi fejezetben már említettem, hogy létezik egy olyan számos vizsgálati eredményből, repülőorvosok által meghatározott átviteli függvény, amely a repülőgép-vezetőre jellemző. A függvényt felépítő elemek egy erősítés, két különböző értékekkel bíró átviteli függvény, valamint egy késleltető blokk, amely az információt meghatározott időeltolódással hivatott késleltetni. Az ábrán látható pilóta képe fölött is megjelenik egy frekvenciaérték. Ez nem más, mint a rá ható 0,32 Hz-es külső zavarás mértéke. Azért érdekes ezt figyelembe venni, mert ez meghatározó tényező a pilóta reakcióidejét tekintve. A külső változásokra való reagálás gyorsasága az egyik legfontosabb kritérium bármilyen elfogás alkalmával.

A repülőgéphez tartozó „RG matematikai modellhez”, egy összegző blokkon keresztül külső turbulens zavarás és a repülőgép-vezető átviteli függvénye kapcsolódik. Ha van változás, akkor a detektált információk, a külső zavarások és a pilóta átviteli függvényének alapján a repülőgép-vezető valamilyen irányba vezérli a vadászgépet. A kiadott parancs a repülőgép felé, a „RG matematikai modelljén” keresztül megy végbe.

A repülőgépre felírható matematikai modell egy negatívan visszacsatolt állapotteres modell hatásvázlataként fog megvalósulni. A SIMULINK programban felépített vázlat megszerkesztését, melyet a képen is láthatunk, a következő fejezetben mutatom be.

6.3 Példa, a vadászgép állapotteres egyenletének felépítésére

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,313 & 56,7 & 0 \\ -0,0139 & -0,426 & 0 \\ 0 & 56,7 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,232 \\ 0,0203 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta] \quad (25)$$

A blokkvázlatok felépítésénél a linearizált repülőgép modellt állapot visszacsatoló szabályzóval szimuláljuk. Kifejezetten azt a linearizált állapotteres modellt fogjuk

használni, amely a behelyettesített számértékekkel a következőképpen fog kinézni.

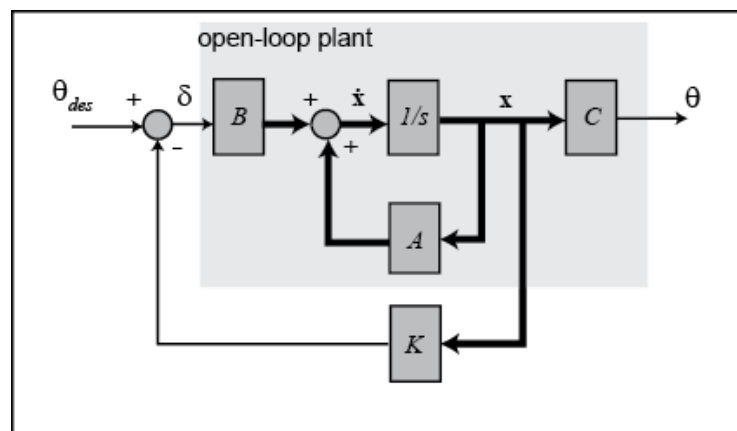
$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \theta \end{bmatrix} \quad (26)$$

A fenti egyenletek megegyeznek az általános, lineáris állapot teres alakkal.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

A SIMULINK program és a fenti egyenletek segítségével építsük fel a modellt. A 25. sz. ábrán látható nyílt hurkú vázlat egy lehetséges formát biztosít a sok közül.



25. ábra Vadászgép nyílt hurkú matematikai modellje²⁶

A SIMULINK programban is elérhető állapotteres modell felépítésénél kövessük a következő lépéseket:

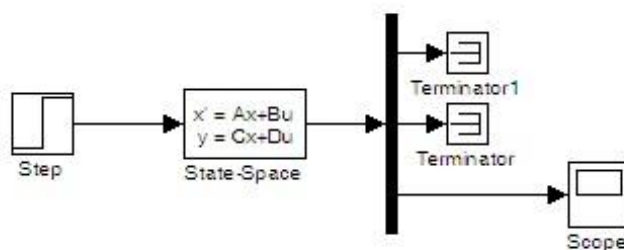
- nyissuk meg a SIMULINK programot és egy új modell ablakot;
- illesszünk be egy egységugrás blokkot a SIMULINK/Források könyvtárból
- a megfelelő értékek megadásához, kattintsunk kétszer a blokkra és állítsunk Step time értékhez 0-t. A végső értékhez írjunk 0,2-t, feltüntetve a 0,2 radián referenciát, amit felveszünk.
- illesszünk be egy Demux blokkot a SIMULINK/Jelirányító könyvtárból. Kétszer kattintsunk ismét és üssünk be „3”-at a kimenetek számához; egy - egy kimenet a három állapotváltozóhoz tartozik.
- illesszünk be egy oszcilloszkópot a SIMULINK/Sinks könyvtárból és csatlakoztassuk a Demux blokk harmadik kivezetését az oszcilloszkóphoz. Ebben az esetben csak a harmadik állapotváltozóval fogunk foglalkozni, amely a repülőgép

²⁶ Szerkesztette a szerző (MS Paint)

Théta szögének felel meg a rendszer kimenetén.

- illesszünk be két Terminator blokkot a SIMULINK/Sinks könyvtárból a Demux blokk másik két kivezetésére.
- illesszünk be egy állapotteres blokkot a SIMULINK/Folytonos rendszerek könyvtárból és bemenetét kapcsoljuk az egységugrás blokkhoz, kimenetét pedig a Demux blokkhoz kössük.
- kattintsunk kétszer az állapotteres blokkra és adjuk meg a rendszer paramétereit, ahogyan azt az alábbi formában látjuk.

A fenti formában a 3×3 -as C egységmátrixot az „eye” paranccsal adjuk meg a megszo-
kott $[0 \ 0 \ 1]$ eredeti állapotteres egyenlet helyett, mert utóbbit a program nem fogadja el.
Ezt azért csináltuk így, mert az állapot visszacsatolásos ellenőrző blokk minden állapot-
változót megmér, nem csak kimeneten lévőket. Ha nem ez a helyzet, akkor egy olyan
részt kell kialakítani, ami megadja a valamennyi nem mérendő állapotváltozót. Mikor
befejeztük, a kész modellnek az alábbi módon kell kinéznie (26. ábra).



26. ábra Visszacsatolás nélküli matematikai modell²⁷

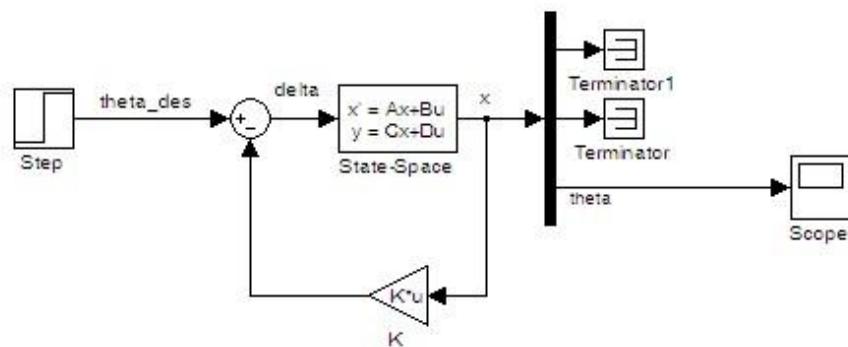
Válasszuk a Start gombot a Simulation menüből. Amikor a szimuláció lefutott kattint-
sunk kétszer az oszcilloszkópra és azon belül az Autoscale gombra. A válaszreakció
instabil. A stabil jel létrehozásához adjunk hozzá egy K erősítési tényezővel rendelkező
állapot visszacsatoló szabályzó blokkot. Az erősítő a Lineáris Másodfokú Szabályzó
megoldással lett kialakítva és számértékileg $K = [-0,6435 \ 169,6950 \ 7,0711]$. Az állapot
visszacsatoló szabályzó hozzáadásához kövessük a következő lépéseket:

- illesszünk be egy Összegző blokkot a SIMULINK/Matematikai operátorok könyv-
tárból és kattintsunk rá kétszer, majd üssük be „|+–”-t a List of signs mezőbe. A „|”
jel szolgál a blokkok portjai között lévő toldaléokra. Helyezzük be a blokkot az egy-
ségugrás és az állapotteres blokk közé.

²⁷ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

- illesszünk be egy erősítő blokkot a SIMULINK/Matematikai operátorok könyvtárból. Ahogy a blokkot kiválasztottuk nyomjunk Ctrl+I-t annak elforgatása céljából. Csatlakoztassuk a kimenetét az összegző blokk negatív csatlakozójára és a bemenetét az állapotteres blokk kimenetére úgy, hogy a fennálló kábelre kétszer kattintva a kimenő jel elágazzon.
- kattintsunk kétszer az erősítő blokkra és üssük be az alábbi ábrán látható adatokat.
- állítsuk be a mátrix erősítésének értékét és változtassuk meg a Multiplication mezőben a beállítást Matrix ($K*u$)-ra.

A megfelelő feliratok hozzáadásával az alábbi formában kell kinéznie a felépített rendszernek (27. ábra).



27. ábra Negatíván visszacsatolt matematikai modell²⁸

²⁸ Szerkesztette a szerző a SIMULINK programból (MS Paint)

ÖSSZEGZÉS

A három különböző elfogási módszer szimulációjáról elmondható, hogy megszerkesztésük a SIMULINK programban, a rájuk jellemző differenciálegyenletek alapján tökéletesen végrehajtható. A szoftver nagymértékben tud segítséget nyújtani az ilyen és ehhez hasonló mozgásformák megalkotásában. A modellezések és a hozzájuk tartozó szimulációk nem csak az ilyen típusú feladatok kivitelezésében használhatóak fel, hanem az oktatás területén is nagy segítséget nyújthatnának. A számítógépes modellezési eljárások elsősorban a repülőműszaki szakirányon tanuló hallgatók körében válhatnak hasznossá, de ugyanakkor a légiforgalmi irányítók oktatásának részét is képezhetik. Az elfogási módszerek alatt végbemenő paraméter-változások nyomon követése minden szempontból hasznosak. A repüléssel foglalkozó és az ezt a szakmát tanuló szakemberek részére mindenképpen ajánlanám, hiszen a repülések, és a célra való rárepülések alkalmazásával mindig tisztában kell lenniük a változó értékekkel.

Dolgozatomban bemutattam a repülőműszaki szempontból is lényeges megközelítési módszerek lefolyását. A három legalapvetőbb elfogás prezentálásával és összehasonlításával azt szeretném elérni, hogy a tényezők alakulása – folyamatok sajátosságait figyelembe véve – minden egyes időpillanatban értelmezhetőek legyenek.

Az elemzések és vizsgálatok végeredményeként azt állapítottam meg, hogy az eltérő célrávezetések esetében akadnak olyan paraméterek is, amelyek szinte megegyeznek, és olyanok, melyek teljesen eltérnek egymástól. A vizsgált célzási szög, megközelítési sebesség, elfogási idő, céltávolság és Doppler-frekvencia változásai és nem utolsósorban az általuk meghatározott repülési görbék tökéletesen szemléltetik a különbségeket, valamint a hasonlóságokat.

Az értékek menetéből azt is leszögezhetjük, hogy a három elfogási módszerből kettő, a tiszta és az előretartásos elfogás között nagyon sok hasonlóságot észrevehetünk. A paraméterek változásait leíró függvények mind az öt esetben, néhány kezdő értéktől eltekintve, közel megegyező monotonitással rendelkeznek. Ez köszönhető annak is, hogy a szimulációk kezdetekor és a modellek felépítése előtt, a kezdeti paramétereket minden egyes megközelítési elv esetében ugyanannyinak állítottam.

A SIMULINK szoftver teljesen rugalmas és a feladatnak megfelelően átalakítható. A kiinduló feltételek átállítása, a struktúra és a dizájn tetszőlegesen változtatható.

A modellek vizsgálatánál olyan eseteket is lehetett volna elemezni, hogy ahány elfogási

módszer, annyi kezdeti feltételt rendelünk hozzájuk. Az összehasonlítás célja természetesen nem ez volt, hanem az, hogy ugyanazon feltételek mellett a három eltérő rávezetés lefolyása során időben hogyan változnak meg az elemzésre kijelölt értékek.

Az elemzések befejeztével azt vettem észre, hogy a párhuzamos elfogási módszer dinamikáját és további sajátosságait tekintve egyáltalán nem hasonlít az előző kettőre. Pályáját tekintve és az elfogási időből is azt mondhatjuk, hogy a megközelítés monoton és nem alkalmazható célszerűen gyors elfogásokra. Tehát egyértelműen kijelenthetjük, hogy dinamikus, gyors és látványos elfogás elvégzésére a tiszta és az előretartásos rávezetés módszerét célszerű alkalmazni.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Gondolatok a légi harcászatról a '60-as évek elejétől napjainkig, (online) url:
http://htka.hu/static/cikkek/legiharc/HTKA_Gondolatok-legi-harcaszatrol-2012-nyomtathato.pdf
(2014.04.15.)
- [2] Repülőgép nemlineáris mozgás – szimulációjának felépítése és tesztelése MATLAB felhasználásával, (online) url:
http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2005_cikkek/bauer_peter_nem_lin.pdf
(2014.03.05.)
- [3] Repülőgépek rávezetése légi célokra, A honvédelmi minisztérium kiadása, 1974, pp. 3-120.
- [4] Yaohan Chu: Folytonos rendszerek digitális szimulációja, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977, pp. 108-117.

MELLÉKLET

1. melléklet: Vadászgépre és pilótára jellemző komplex blokkvázlat

FÜGGELÉKEK

1. függelék: Annotáció
2. függelék: A konzultációkon történő részvétel igazolása (konzultációs lap)
3. függelék: Nyilatkozat

1. sz. függelék:

Annotáció

A dolgozatom lényegében két fő részből épül fel, melynek első egységében három alapvető megközelítési módszert ismertetek, melyek a tiszta, előretartásos és párhuzamos megközelítés. Az elfogásokra jellemző differenciálegyenleteket felhasználva a MATLAB® SIMULINK program segítségével lemodellezem a repülési pályákat. Ezzel egy időben a kezdeti paraméterek változásai is nyomon követhetőek. A SIMULINK programban felépített hálózatok struktúráját ismertetem és kifejtem a könnyebb átláthatóság érdekében. A megközelítések szempontjából négy lényeges paraméter változásait részesítettem előnyben. A célra való rárepülés során fontos változónak tekinthető a vadászgép és a légi cél közötti távolság, és a megközelítési sebesség. Ezek birtokában már meghatározható az elfogáshoz szükséges elfogási idő, illetve nem elhanyagolható tényező a vadászgép célzási szögének időbeni változása. Mind három megközelítési forma modellezése Földhöz és légi célhoz kötött koordináta rendszerben történik. Az egyszerűbb kivitelezést szem előtt tartva, a szimulációk kétdimenziós formában, X és Y koordinátákban készülnek. A különböző módszerek ismertetését és elemzését követően elvégzem azok összehasonlítását. A kialakult különbségeket összevetem egymással és a felvázolom a következtetéseimet.

A munkám második fő részében a vadászgép és pilóta viszonyába adok betekintést. Például egyes esetekben, illetve manőverek során a pilótára jellemző átviteli függvényben szereplő értékek miként változnak meg a különböző mértékű túlterhelések során. A vadászgépet jellemző átviteli függvény levezetését is bemutatom, illetve milyen módszerek alapján lehetséges annak meghatározása. A korszerű vadászpilóta gépeken alkalmazott Doppler-radar működési elvével is foglalkozom, röviden kifejtem az üzemmódjait, illetve hogyan alkalmazható elsősorban sebesség és távolság mérésére.

2. függelék

A konzultációkon történő részvétel igazolása (konzultációs lap)

A honvéd tisztjelölt neve:

Szegény Tamás honvéd tisztjelölt

A belső konzulens neve és beosztása:

Dr. Ludányi Lajos, főiskolai tanár

A témát kiadó önálló oktatási szervezeti egység neve:

Nemzeti Köszolgálati Egyetem

Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar

Katonai Üzemeltető Intézet

Katonai Repülő Tanszék

Nevezett honvéd tisztjelölt a 2013/2014. tanévben a szakdolgozat készítésével kapcsolatos konzultációkon rendszeresen részt vett.

Az elkészített dolgozatot „Vadászgép rávezetéseinek szimulációja és összehasonlítása” címmel bemutatta, a dolgozat saját szellemi termék, plágium gyanúja nem merült fel.

A dolgozatnak a Záróvizsgához kapcsolódó bírálati eljárásra történő beadásával egyetértetek.

Szolnok, 2014. április 25.

.....
Dr. Ludányi Lajos ny. alezredes
főiskolai tanár

3. függelék

Nyilatkozat

Alulírott Szegény Tamás a H_AN4_SHBRM75 tancsoport hallgatója (NEPTUN-kód: B8FYN4) büntetőjogi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a „Vadászgép rávezetéseinek szimulációja és összehasonlítása” című, a Nemzeti Közszerolálati Egyetem Katonai Repülő Tanszéken benyújtott jelen szakdolgozat saját szellemi tevékenységem eredménye, a benne foglaltak más személyek jogszabályban rögzített jogait nem sértik.

Ezennel hozzájárulok ahhoz, hogy a Nemzeti Közszerolálati Egyetem a szakdolgozatom egy példányát a könyvtárában tárolja (elektronikus adathordozón rögzítse), azt mások számára hozzáférhetővé tegye.

Hozzájárulok ahhoz is, hogy más személyek a szakdolgozatomban foglaltakat tanulmányaik, kutatásaik során – a hivatkozási előírások betartásával – felhasználják.

Szolnok, 2014. április 25.

.....
Szegény Tamás
honvéd tisztjelölt