

MSA optimalizálás genetikus algoritmussal

Baráth Márta*, Madácsi Richárd**

*HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt, Budapest, Magyarország
(e-mail: marta.barath@hungarocontrol.hu)

** HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt, Budapest, Magyarország
(e-mail: richard.madacsi@hungarocontrol.hu)

Absztrakt: A minimális szektormagasságok (MSA) nagy segítséget jelentenek a légi jármű vezetők számára nem sztenderd körülmények esetén, valamint általános esetben is növelik a fedélzetben a helyzetudatosságot. Mivel az MSA meghatározása rendkívül számításgépes, ezért az összes lehetséges megoldás végigpróbálása nem járható út. Emiatt főleg szakértői becslésre hagyatkozhat az eljárás-tervező az optimális megoldás keresésében. A jelen tanulmány célja annak bemutatása, hogy milyen módon lehet az automatizációt hatékonyan bevonni a munkába.

1. BEVEZETŐ

A HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt. stratégiai célja a fejlesztésekben való élenjárás és a szolgáltatás minőségének folyamatos javítása. A magyar ANSP a repülési eljárások tervezéséért is felelős Légiforgalmi Módszertani és Koordinációs Osztálya számára a következő fő feladat – a MergeStrip forgalomtervezési koncepció és támogató szoftver megalkotásának folyamánként - a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér repülési eljárásainak felülvizsgálata és az igényeknek megfelelő finomhangolása. Ennek a projektnek a keretein belül kerül sor a minimális szektormagasságok (MSA – Minimum sector altitude) módosítására, amivel ugyanazon repülésbiztonsági szint szavatolása mellett szükség esetén nagyobb rugalmasságot biztosítható a légi jármű vezetők számára.

Az MSA az a legalacsonyabb repülés során használható magasság, ami a minimális 300m (1000 láb) vertikális elkülönítést biztosítja egy repülőteret kiszolgáló rádió navigációs berendezés, mint referenciapont 25 tengeri mérföldes (NM) körén belül meghatározott, 5 tengeri mérföld biztonsági zónával körülvett szektorban (körkikk) elhelyezkedő összes repülési akadálytól, legyen az természetes vagy mesterséges objektum (ICAO Doc8168, 2006).

Joggal merül fel a kérdés, hogy ellenőrzött légtérben, radarirányítás mellett nem a légiforgalmi irányító feladata a biztonságos magasságra szóló süllyedési engedély kiadásával az akadályoktól való megfelelő távolság biztosítása. A válasz természetesen igen¹, de a kérdés sugallja az MSA létjogosultságát is. Mi történik, ha üzemzavar miatt a radar nem használható, vagy bár használható, de a rádió berendezés esetleges meghibásodása miatt a helyes utasítások nem továbbíthatóak? A kérdés különösen érdekessé válik abban az

esetben, amikor a légi jármű további szándéka, hogy az adott légtérben található futópályára leszállást hajtson végre. Értelemszerűen ehhez süllyedni kell, mégpedig - a műszeres megközelítés megkezdése előtt - az MSA magasságra.

Mivel a biztonságos landolás a cél, ezért a lehető legalacsonyabb magasságokat célszerű megadni. Ehhez adott esetben több részszelektort kell szerkeszteni.

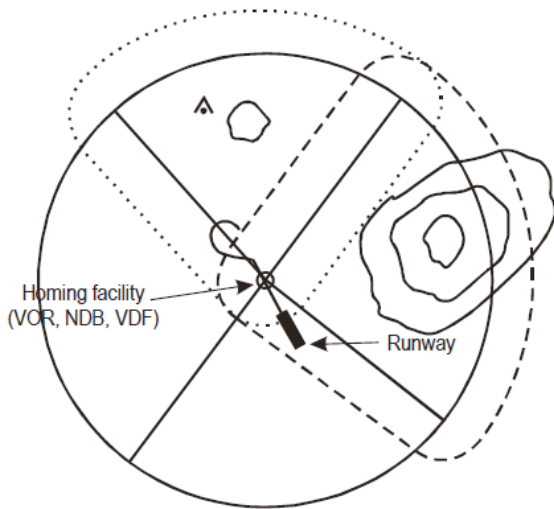
A továbbiakban a félreértések elkerülése érdekében szektorként hivatkozunk részszelektorokra, az MSA pedig a szektorok teljes kört kitevő rendszerét jelenti.

Általános megoldás a földrajzi irányoknak megfelelő kvadránsok kialakítása, de ha a terepviszonyok és akadályok szükségessé teszik, akkor a legkedvezőbb magasságok eléréséhez tetszőlegesen lehet a körkikkeket szabni (1. ábra). A légi jármű vezetője az MSA referenciapontját képező rádió navigációs berendezésre való repülés irányának a szektorokat határoló irányszögekhez (földrajzi észak és a szektort határoló sugár által bezárt szög az óramutató járásával megegyezően) való viszonyításával tudja meghatározni, hogy az MSA mely részszelektorában repül és mi az az által előírt minimális biztonságot magasság.

Az eljárások tervezésének szabályai alapján a szektorokat kettébontani is lehetséges a középponttól számított 10 és 15NM között abban az esetben, ha a repülőteret kiszolgáló rádió navigációs berendezéstől való távolság a légi jármű fedélzetén meghatározható, azaz ha VOR/DME (VHF Omni Directional Radio Range/Distance Measuring Equipment) vagy NDB/DME (Non-directional Beacon/ Distance Measuring Equipment) adja az MSA referenciapontját. A cikkben vizsgált MSA referencia berendezése TPS (Tápiósáp)

¹ 8.6.5.2 Egy IFR repülés radar vektorálásakor, vagy olyan közvetlen útvonal adásakor, amely a légi járművet letéríti az ATS útvonaltól, a radarirányítói engedélyeknek biztosítaniuk kell a terep feletti előírt magasságot mindaddig, amíg a légi jármű el nem ér egy olyan pontot, amelynél a légi jármű vezetője áttér saját navigációra (16/2000. (XI. 22.) KöViM rendelet).

VOR/DME, amely a budapesti műszeres érkezési eljárások kiindulópontja.



1. ábra: MSA kialakításának sematikus ábrája 4 szektorral (ICAO Doc8168, 2006)

2. OPTIMALIZÁLÁS GENETIKUS ALGORITMUSSEL

A szektormagasságot (sector altitude) ebben a cikkben a szektorban található legmagasabb akadály- vagy terepmagasságként értelmezzük.

A mesterséges akadályok, mint pontszerű objektumok véletlen előfordulása miatt differenciálható költségfüggvény nem konstruálható, így például a gradiens módszer nem alkalmazható az optimalizáció során. A hegymászó algoritmus sem megfelelő, mert elképzelhető, hogy egy adott megoldásnál az elmozdulás a terepmagasságok figyelembevétele alapján nem indokolt, így optimálisnak minősülhet, de további elmozdulások során egy mesterséges akadály kikerülhet a szektorból, így a szektormagasság javulhat.

Az alacsony szektormagasság annál értékeesebb, minél nagyobb területet érint, így a legkedvezőbb MSA megoldást a szektorokat jelentő körcikkek középponti szögeinek és a szektormagasságok súlyozott átlagának, mint költségfüggvénynek (cost function, fitness function) a minimalizálásával kapjuk. A szektorok felbontása esetén a súlyozásnál használandó magasság a két részterületre kapott szektormagasság számtani közepe.

Jelölje A a középponti szögek és M a szektormagasságok vektorát.

$$A = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4]$$

$$M = [m_1, m_2, m_3, m_4]$$

ahol szektorfelosztás esetén $m_i = \frac{m_{i1} + m_{i2}}{2}$.

Egy adott MSA megoldás minimalizálandó költsége MA^T .

Jelen cikk célja egy olyan általánosan használható módszer bemutatása, amivel lehetséges a legkedvezőbb, vagy ahhoz közeli magasságokat eredményező szektorizációt megtalálni az összes lehetséges eset kiértékelése nélkül. Ebből ugyanis sok létezik, és az egyes lehetséges opciók vizsgálata is meglehetősen számítás igényes.

4 szektor esetén egész fokokat használva a kör felbontása $\binom{360}{4}$ módon lehetséges, továbbá minden szektorban 7

lehetőség van a szektor bontására (0, 10-15NM egész értékek használatával). Ezért az összes lehetséges kombináció száma

$$\binom{360}{4} 7^4 = 39658871503440.$$

A szektormagasságok meghatározásához a Magyar Honvédség REP-60 akadály-adatbázisát használtuk, valamint Magyarország 50*50m felbontású digitális terepmodelljét. Utóbbiból következik, hogy egy adott megoldás kiértékelése csak a terepviszonyok tekintetében

$$\frac{\pi \left(30NM \cdot 1852 \frac{m}{NM} \right)^2}{50^2} \approx 3879130 \text{ művelettel jár.}$$

A lehetséges megoldások nagy száma, és az egyes megoldások kiértékeléséhez szükséges automatizálás szükségessége miatt az eljárásstervezői szakértelem MSA optimalizációban való használata a terepviszonyok komplexitásának függvényében korlátozott. A tradicionális MSA munkafolyamat első lépése a főbb mérvadó légiforgalmi akadályok azonosítása, majd a terepmodell ismeretében néhány, becslésen alapuló szektorfelosztás megszerkesztése, majd azok kiértékelése. A végső, publikálandó MSA gyakran a különböző megoldások kombinációjából adódik.

Az optimális légtér felosztás genetikus algoritmusokkal (GA) történő meghatározását elvégezte Delahaye et al (1996), valamint kutatások folynak a NextGen DAC (Dynamic Airspace Configuration) programján belül is a témában (Kicinger et al, 2009). Az MSA meghatározása jellegénél fogva szintén alkalmas az evolúciós algoritmusokkal való vizsgálatra. A továbbiakban bemutatjuk a genetikus algoritmus elvi vázát, valamint azokat a módosításokat, amelyeket a problémánk sajátosságai miatt be kellett építeni az alapmodellbe.

A GA alkalmazása feltételezi, hogy a megoldandó probléma egy adott számú paraméterrel jellemezhető (K. F. Man et al, 1996), amelyek a gének, és ezek halmaza alkotja a kromoszómát. Az egy adott MSA szektorizációt reprezentáló kromoszóma génjei a körcikkeket elválasztó irányszögek, valamint a körcikkek felosztásának helye az eljárás tervezési

szabályoknak megfelelően. Utóbbi 0 esetén a felosztás hiányát jelöli.

A jelenlegi MSA első kvadránsa, amely 360° és 90° között helyezkedik el, a rádió navigációs berendezéstől mért 15NM-nél van felosztva. A TPS VOR-tól 15NM-en belül a legnagyobb terepmagasság 346m, míg 15 és 25NM között 831m. A felosztás miatt a két magasság számtani átlagával (588,5) számolunk a költség meghatározásánál. A második szektor (90° és 180° között) legnagyobb terepmagassága 311m, a harmadik kvadránsban (180° és 270° között) pedig a Budapest XII. kerületi Csíz utcai antenna 646m magassága a mérvadó. Végül az utolsó szektor (270° és 360° között) a legmagasabb pontja 756m. Az MSA költsége a fenti képlet alapján a szektorokban található legnagyobb terepmagasságok és a szektorok központi szögeinek lineáris kombinációjaként lett meghatározva.

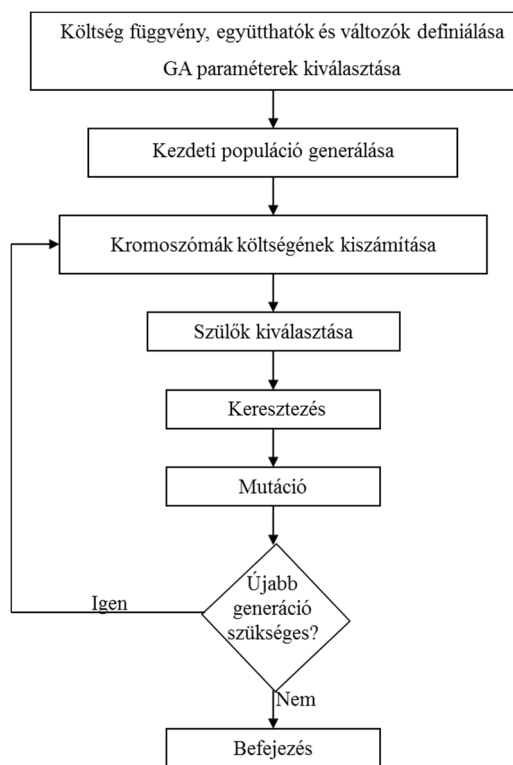
$$\text{Költség} = 90^\circ \cdot 588,5 + 90^\circ \cdot 311 + 90^\circ \cdot 646 + 90^\circ \cdot 756$$

Ezek alapján a cikk írásakor érvényben lévő MSA kromoszómája és költsége:

1. Táblázat: Jelenlegi MSA kromoszómája és költsége

36	9	18	27	1					Költség	20713
0	0	0	0	5	0	0	0	:		5

A GA elvi váza (Haupt, 2004):



2. ábra: A GA elvi váza (Haupt, 2004)

Az algoritmus lényege, hogy a kezdeti, random populáció inicializálása után a kromoszómák a minimalizálandó költség függvény segítségével kiértékelésre kerülnek, majd a szaporításra megfelelő költségű populációhányad keresztezése és mutációja során a kromoszómák várhatóan az egyre kedvezőbb eredményre vezető paraméterekkel fognak rendelkezni.

A keresztezés mechanizmusa a következő. Első lépésként ki kell jelölni a szülő kromoszómákat, amely a mi esetünkben a költség alapján csökkenő sorba rendezett populáció első felének egymást követő tagjai. A szaporításra ki nem választott kromoszómák elvesznek, az ő helyükbe lépnek majd be a keresztezés eredményei. Ez az evolúciós alapokon nyugvó szelektálás biztosítja a legalább lokális optimum felé való konvergenciát. A keresztezésből kapott két kromoszóma génjei megegyeznek a szülei megfelelő génjeivel, kivéve egy véletlen módon kijelölt sorszámú gént, ami a következő képletek segítségével kerül meghatározásra (Haupt, 2004):

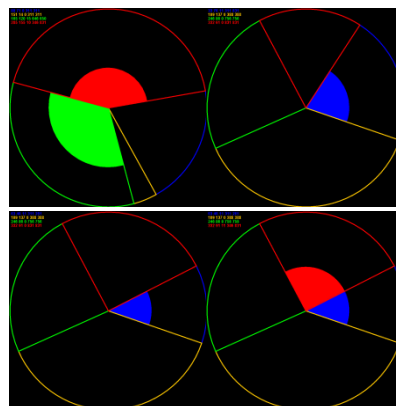
$$g_{új1} = g_m - \beta(g_m - g_f)$$

$$g_{új2} = g_f - \beta(g_m - g_f) \quad (1)$$

ahol g_m jelöli az „anya” megfelelő génjének értéket, g_f pedig az „apát”. β véletlen paraméter a keresztezés során a szülő gének súlyozására szolgál. β az MSA esetén [0,1] halmazon vehet fel értéket. Ennek oka, hogy a szülők génjei által szabott határon nem szükséges kilépni (pl.: $\beta > 1$), mivel a körcikkek kitöltik a teljes kört.

Az adott génállomány felfrissítése (lokális optimumból való kilépése) érdekében mutációra is szükség van. A mi esetünkben ez pusztán azt jelenti, hogy a mutációs rátának megfelelő valószínűséggel megtörténő génmódosulás esetén az inicializálással megegyező módon, de csak az adott génre vonatkozóan új véletlen érték generálódik.

Az alábbiakban az MSA kromoszómák keresztezése során létrejött, kedvezőbb eredményre vezető evolúcióra látható példa a 3. ábrán. Az első két kromoszóma keresztezéséből született a harmadik, majd az első és harmadik kombinációja adta a negyediket. Az első keresztezés alatt a piros és kék szektort elválasztó irányszög módosult, majd a piros szektor felosztása. A megoldások költségei rendre 195412,5; 212590; 206949 és 184881,5.



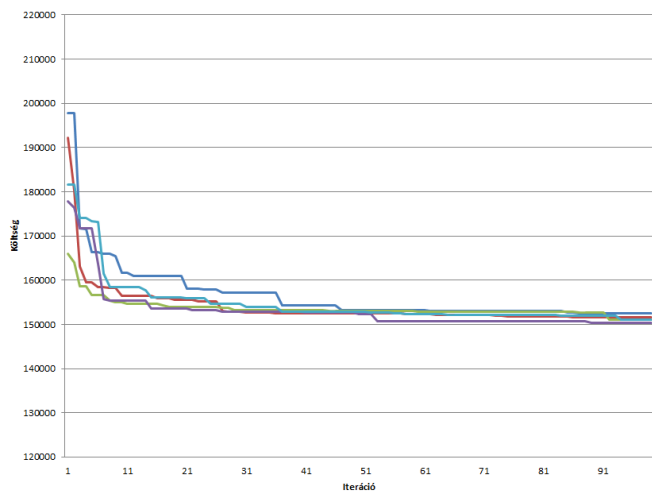
3. ábra: Példa az MSA kromoszómák evolúciójára

Az MSA problematikája számos kérdést felvet a GA használatával kapcsolatban. A gyakorlati tapasztalat azt mutatja, hogy egy egyed költségére a körcikkek irányszögei nagyobb hatást gyakorolnak, mint a szektorfelbontás helye. Emiatt a keresztezésre szánt gének kiválasztásánál nem azonos eloszlású véletlen szám generátort használunk, hanem annak egy módosított verzióját, amivel az első négy gén kisorsolásának esélye 75%, a szektorbontás helyét érintő géneké pedig 25%. Ennek szükségességét alátámasztja az is, hogy két géncsoport az értékészletének számosságát tekintve is jelentősen különbözik. Míg az irányszögek 360 értéket vehetnek fel, addig a szektorbontás helyére csak 7 opció van.

További fontos tényező, hogy minél kisebb a gének által a lehetséges felvehető értékek és az inicializálás, keresztezés valamint mutáció által keletkezett kromoszómák hányadosa, annál nagyobb eséllyel hiúsul meg a keresztezéssel új, kedvezőbb költséget eredményező gén kromoszómába kerülése. Emiatt a klasszikus genetikus algoritmust oly módon változtattuk, hogy ha keresztezésre kijelölt sorszámú gén a két szülő kromoszómában azonos, akkor a génmutációra kerül sor.

3. EREDMÉNYEK

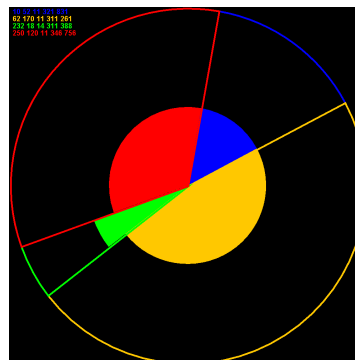
Felvázolt módszerrel a 4. ábrán látható konvergenciát tapasztaltuk 5 futtatás alapján, 16-os populáció méret mellett 100 generáció során (mutációs ráta 10%).



4. ábra: Az MSA egyedek költségének alakulása az iterációk során

A 4. ábrán jól látható, hogy az MSA egyedek a 150000-es költség érték felé konvergálnak. Az előzetes tesztek alapján a 100. iteráció után jelentős változás már nem történik, így a szoftver végső verziójában a 100. ciklus elérése a leállás feltétele. A program futtatásai során a legkedvezőbbnek

bizonyult MSA egyedek közül az alábbi választottuk ki további vizsgálatra:



5. ábra: A kiválasztott MSA felosztás

A kiválasztott MSA kromoszómája és költsége:

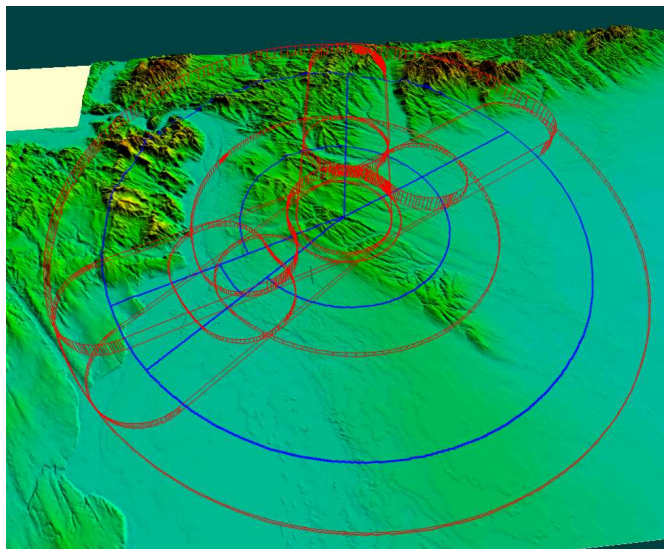
$$\text{Költség} = 52^\circ \cdot 576 + 170^\circ \cdot 286 + 18^\circ \cdot 349,5 + 120^\circ \cdot 551$$

2. Táblázat: A kiválasztott MSA kromoszómája és költsége

10	62	232	250	11	11	14	11	Költség: 150983
----	----	-----	-----	----	----	----	----	-----------------

Amint az a 2. táblázatban is látható a kiválasztott MSA költsége jóval kedvezőbb, mint a jelenleg érvényben lévő MSA-é. Az algoritmus helyes működése esetén a képen látható szektorizáció 5 tengeri mérföldes védőzónáinak külső határai nagy magasságú domborzati viszonyokat és/vagy akadálycsoportokat kerítenek be. A 6. ábrán az eredményként kapott megoldás északkeleti szektora a Mátrát határolja el, az északnyugati szektorbontás pedig a Budai-hegységet és a Pilist választja le.

A kapott megoldás a 6. ábra alapján triviálisnak tűnhet, viszont más domborzati viszonyok és mesterséges akadályok esetén több alternatív, jónak tűnő megoldás lehet, amelyek egyenkénti kiértékelése helyett a cikkben vázolt módszer segítségével gyorsabban eredményre juthatunk. A módszer alkalmazásával olyan eredmény is születhet, amelyre nem feltétlenül gondolna az eljárásrtervező.



6. ábra: A kiválasztott MSA ellenőrzése

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A légitforgalmi eljárások tervezése során gyakran szembesülünk olyan feladatokkal, amelyek adott esetben csak szuboptimális megoldáshoz egzakt matematikai formulák, algoritmusok hiányában csak különböző, szakértői becslésen alapuló opciók szubjektív kiértékelésével jutunk el. E tanulmányban kísérletet tettünk egy adott probléma bemutatásán keresztül egyrészt a megoldások jósági fokának

számszerűsítésére, majd egy evolúciós algoritmussal a legjobb lehetőség megkeresésére. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy az eljárás-tervezői munkában jelenleg még kihasználatlanulagy számítási (soft computing) módszerekkel érdemes és szükséges foglalkozni.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Delahaye, D., Durand, N., Alliot, J-M., Schoenauer, M (1996). Genetic Algorithms for Air Traffic Control Systems, 14th Triennial Conference of the International Federation of Operational Research Societies, Vancouver, Canada.
- Haupt, R. L., and Haupt, S. E. (2004). *Practical Genetic Algorithm*, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.
- Kicinger, R. and Yousefi, A. (2009). Heuristic Method for 3D Airspace Partitioning Genetic Algorithm and Agent-Based Approach, 9th AIAA Aviation Technology, Integration and Operation Conference (ATIO), Hilton Head, South Carolina.
- Man, K. F., Tang, K. S. and Kwong, S. (1996). Genetic Algorithms: Concepts and Applications, IEEE Transactions on industrial electronics, **Vol. 43**, No. 5. October 1996., p. 519-534.
- ICAO Doc 8168 (2006). Procedures for Air Navigation Services, Aircraft Operations, Volume II, Construction of Visual and Instrument Flight Procedures, Fifth Edition. 16/2000. (XI. 22.) KöViM rendelet a légi forgalom irányításának szabályairól