



Csuka Antal

IRÁNYÍTOTT ENERGIÁJÚ FEGYVEREK HULLÁMJELENSÉGEINEK MODELLEZÉSE ÉS SZÁMÍTÓGÉPES SZIMULÁCIÓJA

A jövő különleges fegyvereinek kutatása, fejlesztése stratégiai fontosságú kérdés a legtöbb fejlett iparral rendelkező országban, ahol ennek a feltételei évtizedek óta adóttak. Olyan nagyhatalmak esetében, mint Oroszország és az egykori Szovjetunióból kivált néhány fejlettebb egykori tagállam, valamint Egyesült Államok, Nagy-Britannia, Kína, Németország, Franciaország, Japán, az ilyen kutatásoknak hagyományai vannak. Az Egyesült Államok kimondottan vezető szerepet tölt be, ezen a téren. Az irányított energiájú fegyverek fejlesztésének üteme semmi mással sem hasonlítható össze.

Figyelemre méltóak azok a fizikai jelenségek és alapelvek, amelyek által ezek a fegyverek a célfelületen kifejtik a hatásukat. Elektromágneses és akusztikus hullámok, atomi töltött és semleges részecskék, és ezek útján közvetített energia. Különlegességükhöz, a fizikai elveken kívül, több minden is hozzájárul. A hullámjelenségek fegyverként való felhasználásából következik, hogy kizárólag különleges és nagy teljesítményű hullámkeltők jöhetnek szóba. Hatásuk tanulmányozása és működésük ellenőrzés alatt tartása elképzelhetetlen a számítógépes szimuláció nélkül. Az informatika és számítástudomány a kezdetek óta jelen van ezekben, a fejlesztésekben és hatékonyan szolgálja az ott folyó fejlesztőmunkát. A számítógépes modellezés emellett biztosítja a költség- hatékony fejlesztést is. Belátható időn belül a prototípusgyártás és műszeres mérés teljesen kiszorul és a virtuális mérés, szimulációnak egyeduralma megdönthetatlenné válik. A szimulációnak a kutatásfejlesztő, támogató hatása mellett további más előnye is van. Kibővíti az informatikai hadviselés fogalomkörét, integrálja több tudományterület kutatásának eredményeit és egyben tervezhetővé teszi ezeknek, a fegyvereknek a bevetését a közeljövőben. Az informatika eszközeinek műveleti sebessége ma lehetővé teszi azt, hogy valós idejű szimulációról (**RTS- Real Time Simulation**) beszéljünk. A hullámjelenségek (akusztikus, elektromágneses) szimulációja erre a célra készült programok segítségével végezhető el. Ma nagyon sok olyan fejlesztőcég és vállalkozás létezik, amelyek fő profilja az ilyen programok gyártása és fejlesztése. Ez a fajta tevékenység mára valóságos iparággá nőtte ki magát. A kínálat zavarba ejtően nagy. A megvásárolható szimulációs programok sajnos nem tartoznak a legolcsóbbak közé. A világháló egyike azoknak az információs csatornáknak, amelyen keresztül ezek a programok megrendelhetők és beszerezhetők. Ritkán van értelme, azonban akkora beruházásnak, mint amilyent igényel egy ilyen program beszerzése. Többnyire intézmények engedhetik meg maguknak ezt a luxust, mivel az árak nagyon magasak. Van azonban más megoldás is. Cikkem tárgyát képezi annak bemutatása, hogy milyen lehetőségek jöhetnek szóba, mire kell felkészülnie annak aki, ma a hullámjelenségek szimulációjával szeretne foglalkozni. Röviden kitérek

arra, hogy milyen célszoftverek és általános célú felhasználói programok léteznek, amelyek erre a célra felhasználhatók. Részletesebben csak a MatLab-val foglalkozok. A MatLab alkalmas a hullámjelenségeket leíró differenciálegyenletek feldolgozására, a megfelelő egyenlet-transzformációkat követően. Mint segédprogramot használhatjuk szimulációs célra, de létezik külön ilyen funkciója is. Csak röviden van lehetőségem megemlíteni, hogy milyen más szolgáltatásokat kínál ez a sokoldalú program. A cikkem utolsó harmadában foglalkozok röviden a szimulációs program írásának kérdésével. Ott a hangsúly a hagyományos eszközök használatán lesz, amit azért is tartok fontosnak, mert ez a megoldás kínálja a legtöbb sikerélményt mindamelllett, hogy időigényes, felkészültséget és programozói gyakorlatot igényel. Nem a program megírásnak technikájával szeretnék itt elsősorban foglalkozni, hanem azokkal a metódusokkal, amelyekkel a hullámjelenségeket leíró differenciálegyenletekből a számítógép által feldolgozható algebrai egyenletek nyerhetők.

A MatLab-ban nagyon egyszerűen végrehajthatók azok a modellezések, amelyek trigonometriai függvényekkel megadhatók és leírhatók. Ezek az eljárások teszik lehetővé azt, hogy gyakorlatilag bármilyen természettudományos jelenséggel összefüggő feladat megoldható és adaptálható legyen a PC-s virtuális környezetbe. Cikkem szűk keretein belül mindenből csak néhány fontosnak vélt részletet tudok kiemelni, aminek főként gyakorlati jelentősége lehet nagy, és ami bízom benne, hogy útmutatóként szolgálhat ahhoz, hogy átfogó képet kapjunk, hogy mire is vállalkozunk egyik vagy másik esetben. A programtervezés nehézségei és buktatói ennek a munkának mindenkorai velejárója és sajátossága.

Mire használhatók az elektromágneses hullámok szimulációjára alkalmas egy-kettő ill. háromdimenziós számítógépes programok? Egydimenziós programok alkalmasa a közegek határán fellépő jelenségek vizsgálatára, úgymint a behatolás mélysége, visszaverődés, stb. Pontosan meghatározhatóak a mérések alapján, hogy milyen hatást gyakorolnak, amit ismerni kell a „hullámfegyverek” estében. A kettő és háromdimenziós modellek ezt még szemléletesebbé teszik.

SZÁMÍTÓGÉPES SZIMULÁCIÓ ÉS MODELLEZÉS

Nem létezik olyan tudományterület, ahol a számítógépes szimulációnak ne lenne kiemelt jelentősége és szerepe napjainkban. A szimulációs eszközök a '70-es évek közepe óta látványosan fejlődnek, mára képessé váltak arra, hogy a műszaki tudományoktól a gazdasági életen át minden olyan folyamatot modellezhetővé tegyenek a virtuális térben, ami megfogalmazható és leírható a matematika nyelvén. Csak néhány szakterületet említek meg ezek közül, amelyek esetében a számítógépes szimulációnak kiemelt jelentősége van: biotechnológia, műszaki tudományok, logisztika, mezőgazdaság, stb.¹

¹ Biotechnológiai rendszerek: <http://www.winsaam.com/>
Mezőgazdasági termelés előrejelző: <http://www.apesimulator.it/>
Műszaki: <http://www.lmsintl.com/imagine-amesim-1-d-multi-domain-system-simulation>
Mesterséges élet- intelligencia: <http://alife.org/links.html>, <http://www.framsticks.com/>
Kockázat becslő és elemző: <http://www.simularsoft.com.ar/>

Az informatika gyors ütemű fejlődésének köszönhetően a dinamikusan fejlődő „hardver platformon”, egyre komplexebb eljárásokat használó virtualizáció egyre több szolgáltatást kínál, és hatásosan hozzájárul a szimulációs programok fejlesztéséhez. Egy bonyolult kapcsolat, amiben a fejlődő szoftvertechnológiai megoldások biztosítják azt, hogy a hardverelemek lassúbb ütemű fejlődése ne lehessen akadálya annak, hogy a növekvő erőforrás igényű felhasználói programokat használatba lehessen venni. A szimuláció egyike azoknak az eljárásoknak, amelyeknek az erőforrásigénye esetenként nagyon nagy lehet és továbbfejlesztésüknek komoly akadálya lehet az, ha a hardver nem fejlődik megfelelő ütemben. Ezen segít újabban a virtualizáció, ami nem egyéb, mint a gépi erőforrások jobb kihasználásának programtechnológiai megvalósítása. A szimulációnak kulcsfontosságú szerepe van a küszöbön álló műszaki és technológiai reformban²³.

A számítógépes szimuláció előnyei és hátrányai

A szimuláció mellett felsorakoztatott néhány, igen komoly érvet fontosnak tartok megemlíteni:

- hibatűrő rendszert eredményez;
- a beruházás költsége kisebb;
- alkalmazásával a fejlesztési idő jelentős mértékben lecsökken.

Legfőbb hátrányként szokták emlegetni azt a riasztó szám adatot, ami ma a számítástechnika fejlődésének köszönhetően sokat változott. Mégis érdemes megismerni, mert a mai statisztikai adatokkal összevetve, jól érzékelteti, hogy milyen gyors ütemű fejlődésnek lehetünk a tanúi.

A Wisconsin kísérletről van szó, ami azt mutatta ki, hogy a szimuláció esetében hozzávetőleg 10 000-szeres sebességsökkenéssel kell számolni a valós idejű folyamatokhoz képest. Ez azt jelenti, hogy egy 1 perces valós idejű esemény hozzávetőleg 7 nap szimulációs időnek felel. Egykor ez komoly problémát jelentett, amikor még szóba sem jöhetett a valós idejű jelfeldolgozás és szimuláció. Ez ma már a múlté, a gépi erőforrások gyors növekedésének köszönhetően. A valós idejű szimuláció feltételei ma adottak ugyan, de ez alatt gyakran nem azt értik, amit valójában jelent. Érdemes megjegyezni, hogy bizonyos késleltetéssel minden esetben számolni kell, hiszen végtelenül nagy műveleti sebességről nem beszélhetünk. Jobb esetben is csak olyan szimulációs eljárásról lehet szó, amely esetében az eredmények változatlan késleltetéssel kinyerhetők. A „valós idő” alatt is mást kell érteni, hiszen nem ugyanazt jelenti, mint a valós idejű analízis esetében gyakran emlegetett valós idejű feldolgozás. Gyakran felmerülő kérdés, hogy mennyire tekinthetők hitelesnek a szimuláció során nyert eredmények. A vélemények megoszlanak, és gyakran képezik vita tárgyát. Többféle eljárás létezik, amelyek a hibák korrekcióját igyekeznek megvalósítani, de ma még egyik sem tekinthető tökéletesnek. Külön kutatás tárgyát képezhetnék azok az eljárások, amelyekről a felhasználó semmit sem tud, de évtizedek óta komoly feladat elé állítják a matematikusokat. Ezek a nehézségek a folyamatos, analóg jelek, digitalizálása, vagyis diszkrét jelekké történő alakítása nyomán merülnek fel.

² JÉKI LÁSZLÓ: Megállapodás az ITER felépítéséről - Fizikai Szemle. 55/8 (2005) 296. old.

³ <http://tech.transindex.ro/?hir=5474> (2009.02.02.)

A hibaarány csökkentése csak úgy lehetséges, ha részletekbe menően ismertek a folyamatok háttérében meghúzódó fizikai jelenségek és tudni lehet, hogy a matematikai modellek mennyire pontosan írják le azokat. [2]

A számítógépes modellezés és szimuláció fejlődése

A hardver fejlődésével egyidejűleg, a tudományos számítások elvégzésére alkalmas programeszközök is sokat fejlődtek. Az első ilyen programnyelv a Fortran volt. A Fortran 1950 óta⁴, a C programozási nyelv 1960 óta a mai napig használható a szimulációs programok készítéséhez. Ebből következik az, hogy olyan eszközökről van szó, amelyek figyelmet érdemelnek. A Fortran utolsó változata 1995-ben jelent meg, ez volt a Fortran 95. Egyfajta divatiránynak is tekinthető JAVA, XML csak az utóbbi években jutott komolyabb szerephez, alapja egyébként is a C++ programozási nyelv, tehát „nem esett messze az alma a fájától”. Fél évszázadnak kellett eltelnie ahhoz, hogy a számítógépes szimuláció azokat az eredményeket hozza, amelyeket ma ismerünk. A XIX. század közepe óta ismertek és azok a differenciál és integrál egyenletek, amelyekkel akadálytalanul leírhatók a legkomplexebb fizikai folyamatok is. Gondolok itt a Maxwell egyenletekre (1864). Ezekből, az egyenletekből származtathatók a hullámjelenségeket leíró differenciál egyenletek. Az 1950-ben kidolgozott FORTRAN programnyelv az a szoftver, amelyik egyedülállóan alkalmas volt már akkor is a tudományos számítások elvégzésére. 1960-ban megjelent az első didaktikai célú szimulációs szoftver is. Ezt egy nagyon lassú és látszólag vontatott fejlődés követte, akárcsak az irányított energiájú fegyverek esetében. Érdekes a párhuzam. Csak 90-es évek eleje óta van szerepe a szimulációnak és modellalkotásnak a műszaki fejlesztésekben. Fél évszázad múltán a szimuláció még mindig „a kiváltságosok” eszköze, azoké, akik ma ennek az árát képesek megfizetni. A fegyvertechnológiai fejlesztések számítógépes szimuláció nélkül, ma nem képzelhetők el. Alkalmazásuknak szükségességét gazdasági, politikai és társadalmi tényezők egyaránt befolyásolják. Ezek közül csupán egy a költség-hatékony megoldások alkalmazása. A számítógépes szimuláció fontos eszközzé vált az irányított energiájú fegyverek működésének a modellezésében. Alkalmazásának igénye több mint három évtizede megfogalmazódott, azonban ennyi időre volt szükség, ahhoz, hogy a számítástudomány, programozás technika olyan módszereseket dolgozzon ki, amelyekkel végrehajthatók lettek a differenciál és integrál egyenletek transzformációi. Ezek a módszerek és eljárások ma a jól ismert; Fourier, Laplace, Z transzformációk.

A matematika, ha nem is gyors ütemben és túl látványosan, de fejlődik és fejlődésre kényszerült az utóbbi években is, amikor olyan programozás technikai módszereseket dolgoztak ki a fejlesztők, amelyek ma a korszerű objektumorientált programozás alapját képezik.

⁴ <http://www.sdynamix.com/> (2009.03.07.)

A hullámjelenségek számítógépes szimulációja

Az irányított energiájú fegyverek működését leíró hullámjelenségek szimulációjának lépései az alábbiak szerint foglalhatók össze:

- a szimuláció tárgyának meghatározása;
- feladat megfogalmazása;
- szimuláció eszközeinek a kiválasztása;
- matematikai modell megalkotása;
- transzformációk végrehajtása;
- programozás, kódolás;
- hibaellenőrzés;
- szimulációs eredmények kiértékelése.

A szimuláció tárgyának meghatározása

A feladat megfogalmazását minden esetben megelőzi annak a tárgyra vonatkozó elemzés és vizsgálat. Esetünkben el kell dönteni, hogy milyen folyamatokat, jelenségeket kívánunk vizsgálni a számítógépes szimuláció eszközeivel. Más egyenletekből kell kiindulni és matematikai transzformációs metódusokat kell alkalmazni, akkor amikor az elektromágneses, vagy akusztikus hullámok szabadtéri hullámterjedésének a vizsgálata a feladat és egészen másokat, amikor a hullámok más körülmények közti viselkedését kell vizsgálni, úgy mint a rezonátorok, hullámvezetők esetében.

A nagyenergiájú hullámkeltő eszközök, HPM (*High Power Microwave*) csövek szimulációs kísérletei az 1962-es évekig nyúlnak vissza (*Dawson munkássága*)⁵. Ekkor dolgozták ki a részecske és cella alapú szimuláció alapjait, amit ma PIC (*Particle- In- Cell*) szimuláció néven ismerünk. Ez a szimulációs eljárást szokták a HPM források folyamatainak teljes fizikai leírásnak, vagy modellezésnek is nevezni. A '90 évek első felében megvalósult ezeknek, az eszközöknek a 3D-s szimulációja is. Külön hivatal alakult, ami ezt a projektet felvállalta, „DoD's High Performance Computing Modernizations Office's Challenge Project”, a rádiófrekvenciás fegyverek virtuális prototípusainak a kidolgozásával volt megbízva. [3] Két módszer, eljárást alkalmaznak a leggyakrabban a HPM hullámkeltők szimulációjánál. Az egyik a korábban említett PIC szimulációs eljárás, ami a Vlasov – Maxwell egyenletrendszer speciális alkalmazásán alapul. A másik a parametrikus kódok alkalmazása, ahol eszköz specifikus egyszerűsített hipotézisek szolgálják a pontos és gyors értékbecslést, a működést leíró egyenletekben. A HPM modellezéssel foglalkozó szakemberek, ellentétben azokkal, akik a vákuncsőves technológiával foglalkoznak, ma leginkább a PIC modellezést alkalmazzák. [4]

A szimuláció eszközének a kiválasztása

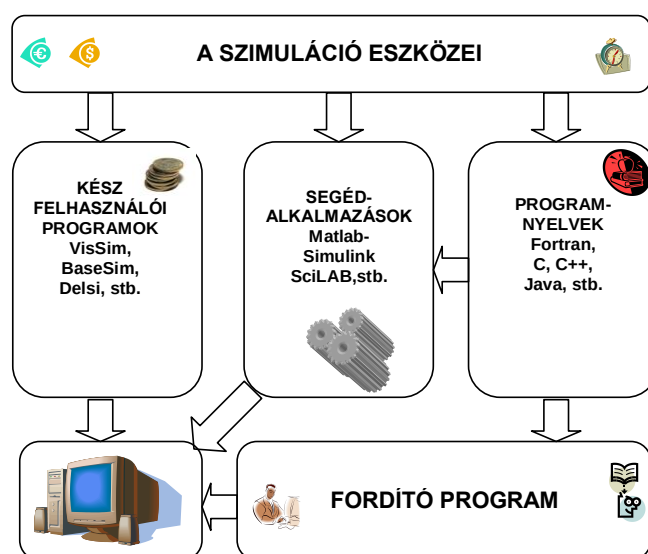
A szimuláció eszköze alatt azt az alkalmazást, felhasználói programot értem, amely alkalmas a vizsgált fizikai jelenség, folyamat virtuális gépi megjelenítésére, modellezésére. Ilyen felhasználói

⁵ IEEE Transactions on Plasma Science, Special Issue on High Power Microwaves, 1998.

programokból a kínálat ma nagyon nagy, attól függően, hogy éppen mire is van szükség, és milyen feladatot kell ellátnia. Célnak megfelelő programot mégsem könnyű olykor találni és esetenként eldönteni sem egyszerű, hogy a például a hullámegyenletek gépi feldolgozásához és szimulációjához, hogy milyen eszközt vegyünk igénybe. Ennek eldöntésében segíthet az 1. ábra. A szóba jöhető megoldásoknak három formáját mutatja be az ábra. Az első megoldás a legkényelmesebb az összes közül. Ha létezik a célnak megfelelő, készen megvásárolható szoftver, akkor annak beszerzése csak a megfizethetőségén múlik. Ha mégsem kapható készen, akkor egészen biztosan akad olyan programfejlesztő cég, amelyik rövid határidővel vállalja az elkészítését.

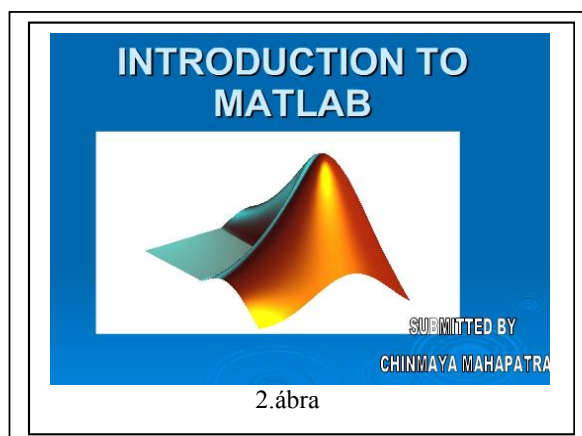
A szimulációs programokat készítő cégek közt nagy múltú vállalkozások is akadnak szép számban, ilyen a VisSim, az iBright, Mesquite, Cedrat, stb. A Cedrat az egyike azoknak, amelyek a szupravezetők alkalmazásának modellezésével is foglalkozik, többek között. Látszólag mindenre van megoldás, legalábbis ezt sejteti a bő kínálat. A kifejlesztett alkalmazások látványos kezelőfelülete és kényelmi megoldásai azonban elfedik a lényegét, azokat az eljárásokat, módszereket, amelyeket csak a programfejlesztő és gyártó ismerhet. Nehezen lehet elképzelni olyan folyamat, amihez ne lehetne szimulációs programot vásárolni, vagy készíteni, mivel ma ehhez minden eszköz adott, és mindenhez létezik megfelelő matematikai, leíró módszer. A folyamatok modellezése még akkor sem ennyire egyszerű. Szimulációs programokhoz ezen kívül más módon is hozzá juthatunk. Vizsgálatom tárgyát kizárólag a legális megoldások képezik.

A második megoldás olyan „segédalkalmazás”, használatát jelenti, amelyik alkalmas arra, hogy a saját grafikus keretrendszerébe illessze, a programozás eszközeivel elkészített forráskódot az ismert programozási technikák (nyomkövetés, fordítás, linkelés) használata nélkül, és közvetlenül feldolgozza, majd megjelenítse az eredményt.



1. ábra

Egy ilyen program rendszerint alkalmas arra, hogy feldolgozzon megfelelően paraméterezett matematikai függvények. Ilyen programok egyike a Mathworks Inc. által kifejlesztett MatLab.

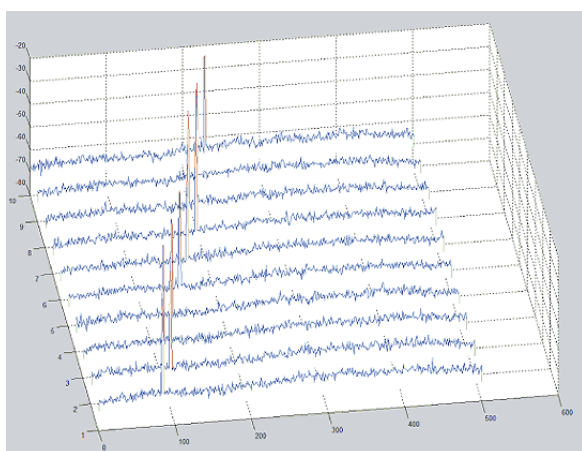


2.ábra

A 2. ábrával szeretném érzékeltetni, hogy egy olyan professzionális, sokoldalú programról van szó, amilyen nem sok van ebben a kategóriában. Csakúgy, mint a legtöbb professzionális grafikus tervező és modellező program, a MatLab is több modulból áll, amelyekből kiválasztható a célnak legmegfelelőbb. Hullámegyenletek

feldolgozására és szimulációjára is kiválóan alkalmas. Alkalmas matematikai műveletek elvégzésére és az eredmények grafikus megjelenítésére (lineáris algebra, mátrix műveletek, egyszerű számítások, stb.), használható továbbá algoritmusok fejlesztésre, modellezés- szimuláció –prototípuskészítésre, adatok analízisére és feldolgozására- megjelenítésére, tudományos számítások grafikus megjelenítésére, alkalmazásfejlesztés- felhasználói grafika interfész készítésére.

A moduljai által ma már képes képfeldolgozásra, mérési adatok feldolgozására és kiértékelésére, írásanalízis, stb. Sokoldalúságát, azt hiszem jól érzékelteti a 3. ábrán látható, többcsatornás RF mérés adatainak „waterfall” típusú megjelenítése⁶. Nem az ábra minőségén van a hangsúly a 2. ábrával összehasonlítva, hanem a mellette látható forrásprogram egyszerűségén. Bármennyire hihetetlen ezzel a néhány soros programmal hozható létre az a ciklus, amelyik elvileg egy interfész 10 bemenetén érkező jeleket beolvassa, és grafikusan megjeleníti. A MatLab nemcsak egydimenziós szimulációra alkalmas, hanem kettő, sőt háromdimenziós felületek is létrehozhatók a segítségével. Egy háromdimenziós színes hálómoddellre láthatunk példát a 4. ábrán.



3.ábra

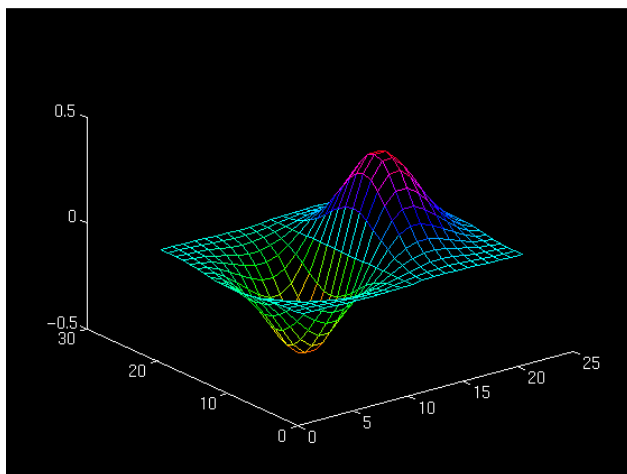
```
for i=1:10
    Tracedata(i,:)=Trace1;
    pause(0.1);
end
waterfall (Tracedata);
```

⁶ http://www.mwrf.com/Files/30/8091/Figure_01.gif

A Matlab egy keretrendszer, amiben saját utasításaival megírt programot illeszthetünk, és azt képes futtatni a program éppen úgy, mint egy programozási nyelvben megírt program. Kezelése viszont jóval egyszerűbb. Képes más programok paramétereinek átvételére és feldolgozására is. Az 1. ábrán látható egyirányú nyíl ezt a kapcsolatot fejezi ki. A Matlab még mindig kevesebbe kerül, mint a legtöbb szimulációs „célszoftver”. Licenc köteles programról van ugyan szó, de létezik ennek a „beta student” változata is, ami ingyenesen letölthető. Felhasználói, ingyenes licenchez is hozzá lehet jutni, bizonyos megkötések és korlátozások mellett⁷. Esetünkben az ingyenes próbaverzió kielégítő megoldást jelent, mert tartalmazza mindazokat a funkciókat, amelyek szükségesek a hullámegyenletek feldolgozásához és azok grafikus ábrázolásához.

Akusztikus hullámok egydimenziós analízise MatLab-val

A MatLab alkalmassá tehető az FDTD⁸ algoritmusok közvetlen feldolgozására és végrehajtására is. Egyszerűbb esetben erre nincs feltétlenül szükség, mert trigonometriai függvények felhasználásával az egyenletek előállíthatók. A jelenséget leíró differenciál egyenletek feldolgozásához egyik lehetőség az FDTD metódus és transzformáció.



4. ábra

Példa a $z(x,y)$ kétváltozós függvény ábrázolása MatLab-ban:

$$z(x,y) = x \exp(-x^2 - y^2)$$

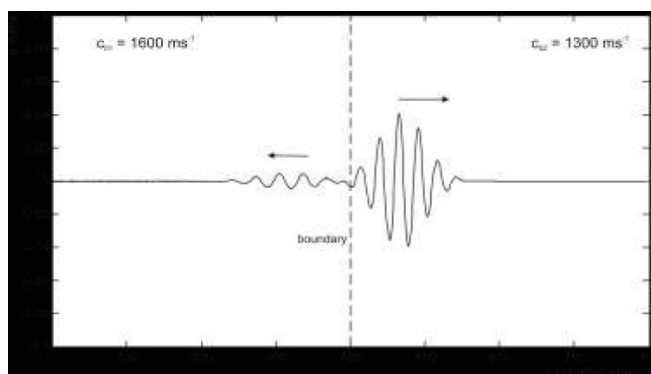
Megadásának formája a MatLab-ban:

```
>> [x,y] = meshdom(-2:.2:2, -2:.2:2);
>> z = x .* exp(-x.^2 - y.^2);
>> mesh(z)
```

Az FDTD módszernek, csakúgy, mint más transzformációs eljárásoknak van egy nagy hátránya, nevezetesen az, hogy a memóriaigénye nagyon nagy lehet, amikor egy háromdimenziós mátrixot egybe tölt be a memóriába a determináns kiszámításához. Hátránya mellett számtalan előnye is ismert, de ezek részletes ismertetésére jelen cikkem keretein belül nem vállalkozhatok. Egy példán keresztül szeretném röviden bemutatni, hogy miképpen használható a MatLab a hullámformák, ezen belül is egy akusztikus hullám szimulációjához (5. ábra).

⁷ <http://castingoutnines.wordpress.com/2006/11/10/free-beta-of-matlab-student-version-for-intel-macs/>
http://www.mathworks.com/academia/student_version/ (2009.03.08.)

⁸ **FDTD**- Finite Difference Time Domain



5. ábra

Itt egy „egydimenziós” szimulációra láthatunk példát, ahol egy $P_0=100\text{kPa}$ hangnyomással keltett 1MHz-es hullám reflexiója és tovaterjedése figyelhető meg, két egymástól eltérő törésmutatójú közeg határán. Megfigyelhetők a másodrendű és harmadrendű felharmonikusok megjelenése. A program alkalmas nemlineáris közegben terjedő hullám modellezésére is, ahol vizsgálhatók a felharmonikusok energiájának a növekedése is. Sok más lehetőséget is kínál. A MatLab segítségével egy hatékony és könnyen kezelhető szimulációs programhoz juthatunk.

Szimulációs program készítésének alapjai

A harmadik megoldás, amivel szimulációs programhoz juthatunk, az a program megírása. A programnyelv kiválasztásának szempontjait én nem tartom annyira fontosnak, ezért részletesebben nem is akarok ezzel foglalkozni. Szimulációs programunk megírásához, véleményem szerint, még mindig kiválóan használható a legtöbb, elavultnak vélt programnyelv. Hogy éppen mit kényszerülünk használni, azt sokkal inkább a fejlesztőkörnyezet határozza meg. A program írásához használható a FORTRAN programnyelv is, ha nem félünk az egyébként megalapozatlan kritikától. A FORTRAN-nak létezik WinXP felületen futó változata is⁹. De éppen olyan jól használható erre a célra a C++ is, akárcsak a divatosnak tekintett JAVA programnyelv. A program írását, azaz kódolását megelőzően szükség van a feladat matematikai modelljének megalkotására. Az elektromágneses hullámok differenciálegyenletekkel vannak leírva, esetenként integrátorokkal, de előfordul az is, hogy integrál minimalizálással (pl. a jel energia integrálja). Az időben folyamatosan változó, hullámjelenségek leírására szolgálnak a Maxwell egyenletekből levezetett hullámegyenletek. Ezekből, az egyenletekből kiindulva, azok általános, vákuumra érvényes alakjából, amennyiben töltések nincsenek jelen, azaz $\rho=0$, és áram sem folyik $j=0$, akkor a következő egyenleteket kapjuk:

$$\text{rot}H = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}, \quad \text{rot}E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}, \quad \text{div}H = 0, \quad \text{div}E = 0. \text{ egyenleteket kapjuk.}$$

A tér és időváltozó szerinti egyenletek egydimenziós alakja a következőképpen néz ki:

⁹ <http://www.star.le.ac.uk/~cgp/fortran.html> (2009.02.04.)

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t}, \quad -\frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t}. \quad (1)$$

ahol, E és H egymásra merőleges vektorok.

Kétdimenziós modellhez négy, háromdimenziós modellhez összesen hat egyenletre van szükségünk.

Ezek a következők:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right), \quad \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right), \quad \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right), \quad \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right), \quad \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

Differenciál egyenletek nem tudunk kódolni, nem tudunk belefoglalni a program forráslistájába. Látható, hogy a hullámjelenséget leíró függvények folyamatos független változók értékétől függenek, amiből következik, hogy végtelen sok értéket vehetnek fel. A nehézséget éppen ez jelenti, hogy a számítógép csak olyan sorozatokkal tud dolgozni, amelynek véges számú elemei vannak [5].

Az elektromágneses hullámok differenciál és integrál egyenleteit (Maxwell egyenletek) végtelen elemszámú sorozatok írják le, valós változók esetében. Következésképpen szükség van azok transzformációjára. A transzformáció során nyerhetők azok az algebrai egyenletek, amelyek viszont már kódolhatók, és amelyekre épülhet a gépi program. A programozás, programkészítés részével a cikkem jelenlegi keretein belül nem kívánok foglalkozni, mert az éppen olyan programozói feladat, mint más diszkrét értékek feldolgozására alkalmas program megírása. Addig is, ameddig ezekhez a diszkrét értékekkel dolgozó egyenletekhez eljutunk, végre kell hajtani az említett transzformációkat. Nagyon sok transzformációs módszer közül választhatunk, de ezek közül csak kettőt említek meg, mert ezek a leggyakoribbak:

- véges differenciál (Finite Difference),
 - o determináns : üregrezonátor egyenleteinek megoldása,
 - o Laplace egyenlet: hullámvezetők egyenleteinek közelítő megoldása,
- véges elem (Finite Element).¹⁰

A véges differenciál módszer alatt az FDTD (Finite Difference Time Domain) eljárás értjük. Az összes közül ez a leggyakrabban alkalmazott transzformációs eljárás. Ezt a modellalkotási eljárást Yee dolgozta ki 1966-ban¹¹. A legegyszerűbb módszernek tekinthető, aminek segítségével megoldhatók a Maxwell egyenletek. Kizárólag lineáris egyenletek feldolgozására alkalmas, passzív áramkört elemek esetében ez nem is jelenthet problémát. Abban az esetben, ha nemlineáris egyenletek megoldására kényszerülünk, akkor használni kell a különféle iterációs eljárásokat [6]. Az iterációs eljárások pontatlanabb módszerek, ami nagyszámú művelettel és további „gépi erőforrások” lekötésével jár.

¹⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method

¹¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Finite-difference_time-domain_method

Ezért kerülnek sokkal többre a szupravezetők működését modellező, nemlineáris függvények kezelésére is alkalmas szimulációs programok. De ez csak egy kiragadott példa, a sok közül.

A matematikai modell alapját képező differenciál és integrál egyenletek, más- más formát öltenek, és más módszerek szerint kerülnek feldolgozásra akkor, amikor szabad térben terjedő hullámokról van szó és egészen más módszer szükséges akkor, amikor a zárt térben való viselkedésüket kell vizsgálni. Lássuk, miképpen jutunk el az algebrai egyenletekhez. Az egyszerűség kedvéért az „egydimenziós” módszerrel folytatom, amelyben a hullámegyenlet összevont formája a következőképpen néz ki:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}, \text{ Ezt az alakot az (1) egyenletek átrendezésével, négyzetre emelésével és a}$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \text{ bevezetését követően kapjuk, ahol a } c_0 \text{ a hullám terjedése az } \epsilon_0 \text{ permitivitású és } \mu_0$$

permeabilitású vákuumban.

Az egyenletnek két megoldása van. Ezek közül az egyik hullám pozitív irányba halad. Diszkrét változókat tartalmazó egyenlete a következőképpen néz ki:

$$E(x, t) = E_1(x - ct) + E_2(x + ct)$$

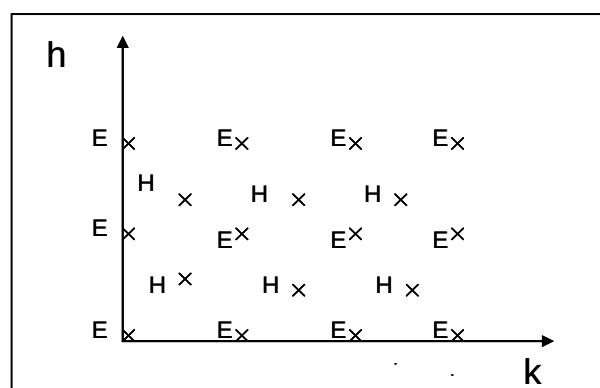
A jobb oldalon álló két függvényt a peremfeltételek és kiindulás feltételek határozzák meg.

A cellákban bevezetve a $h = \frac{x}{N}$ összefüggést, ahol N a cellában alkalmazott osztások száma, kapjuk a

tér egységeket (kvantumokat), majd időben is elvégezve ugyanezt és bevezetjük a δ idő egységet, akkor felírható a következő egyenlet, amelyben az $E(k, n)$ a térváltozó diszkrét alakja.

$$\frac{E(k, n+1) - 2E(k, n) + E(k, n-1))}{\delta^2} = c^2 \frac{E(k+1, n) - 2E(k, n) + E(k-1, n)}{h^2}$$

Az 6. ábrán egy elektromágneses hullám mágneses és sztatikus terének síkbeli eloszlása látható, aminek alapján átírhatjuk, transzformálhatjuk a (1) differenciálegyenleteket.



6. ábra

Egy egységnek tekintve két erővonal közti távolságot, felírhatók a következő parametrikus egyenletek:

$$\frac{E(k+1, n) - E(k, n)}{h} = -\mu \frac{H(k+1/2, n+1/2) - H(k+1/2, n-1/2)}{\delta} \text{ és}$$

$$-\frac{H(k+1/2, n+1/2) - H(k-1/2, n+1/2)}{h} = \varepsilon \frac{E(k, n+1) - E(k, n)}{\delta}.$$

Megkaptuk a differenciál egyenletek algebrai alakját. Ez a két egyenlet az „egydimenziós” elektromágneses hullám szimulációs programjához szükséges két alapegyenlet, ahol az időegységeket δ , a léptéket vagy téregységet a h változó jelképezik.

Kettő, illetve háromdimenziós hullám (felület) szimulációs programjához csakúgy, mint a (2) egyenletrendszer esetében négy, illetve hat algebrai egyenletet fogunk kapni. Kezdeti feltételek megadásával, az egyenletben szereplő változók ciklikus értékadásával kirajzoltathatók a görbék. Felületek hálómódelből néhány programozási technikával (élek elrejtése), létrehozhatók.

Összegzés

A cikkemben összefoglaltam, hogy milyen lehetőségünk van arra, hogy a számítógépes szimuláció eszközeivel vizsgálni tudjuk az irányított energiájú fegyverek működésének alapját képező hullámjelenségeket. Vázoltam három lehetséges formáját annak, hogy szimulációs programhoz jussunk. Ezek közül az első egy kész program megvásárlása, ami a legköltségesebb megoldások egyike. A második olyan többcélú program beszerzése, amelyik vagy képes a matematikai egyenletek feldolgozására és a hullámformák kirajzolására, vagy rendelkezik szimulációs, modellező funkcióval. Példaként röviden bemutattam a Mathworks- MatLab programját, ami véleményem szerint kiválóan használható erre a célra. Kezelésének megtanulása nem vesz több időt igénybe, mint a harmadik megoldásként ismertetett programkészítés, ami ráadásul nagy programozási gyakorlatot is megkíván. A cikkem utolsó fejezetében röviden bemutatattam, hogy milyen transzformációs eljárások által juthatunk a számítógép által feldolgozható lineáris algebrai egyenletekhez, a hullámjelenségeket leíró differenciálegyenletekből. Ha ezt sikeresen végrehajjtuk, akkor semmi akadály sem lehet annak, hogy az elektromágneses és akusztikus hullámok szimulációjára alkalmas programot írjunk mi magunk. Egy szimulációs program megírása bár nem egyszerű feladat, mégis az egyedüli lehetőség arra, hogy a legrugalmasabb, legkönnyebben továbbfejleszthető és legtöbb sikerélményt nyújtó megoldáshoz jussunk.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] KÁTAI István: Szimulációs Módszerek, Tankönyvkiadó, Budapest 1981
- [2] HEGYESI László-MIHÁLY László: Szimuláció az elektronikában, General Press Kiadó, Budapest, 2002.
- [3] www.hpcmo.hpc.mil (2009.02.11.)
- [4] A. A. Mondeli, B. Levush, J.P. Verboncoeur, C.K. Birdsall: Advances in modeling and Simulation of Vacuum Electronic Devices, IEEE 87, 1999, 804p
- [5] Richard C. BOTTON, Jr. „Computational Methods for Electromagnetics and Microwaves, Wiley publications, New York, 1992, 87p
- [6] Dipl.-Ing. Ayman DUZDAR: Design and Modelling of an UWB Antenna for Pulsed Microwave Radar Sensor, Dissertation, Kassel, 2001, 51-97 pp.