

Keksz Ernő

KITERJESZTETT LÉGVÉDELEM ÉS LÉGTÉRELLENŐRZÉS SZENZORHÁLÓZATI ALAPOKON

SZENZORHÁLÓZATI SZEMLÉLET

Az eredményes harctevékenység egyik kulcs kérdése a csapásmérő és légi támadó eszközök megfelelő időben történő észlelése, (felderítése), azonosítása, repülési paramétereik pontos meghatározása. Mivel az ellenséges légi eszközök várható megjelenése és tevékenysége a repülésre alkalmas magassági tartományok teljes vertikumában elképzelhető, és mivel mozgás irányuk előre nem definiálható (lásd 2001.09.11.), ezért a folyamatos, összehangolt légtér-figyelés és ellenőrzés megvalósítására van szükség. Ilyen volumenű ellenőrzést csak nagy számú mérőeszkővel lehet biztosítani. Ezen mérőeszközök vagy szenzorok által gyűjtött információk feldolgozását eredményesen csak összehangolva lehet eredményesen elvégezni. Azokat az elemeket, amelyek részt vesznek ebben a folyamatban célszerű hálózatba szervezve üzemeltetni. A szenzorhálózat biztosítja a megfelelő detekciós valószínűséget, ill. mérési pontosságot. A hálózatba szervezett mérő és jel feldolgozó, valamint irányító berendezések, lehetőséget biztosítanak a gyors reagálásra és a beavatkozó szervek vezérlésére is. A hálózat alap elemei a szenzorok és mérőberendezések, melyek különböző fizikai mennyiségek mérésére alkalmasak. A mért adatokat továbbítják a hálózat olyan elemei felé melyek rendelkeznek u.n. nyelő tulajdonságokkal. A nyelők tartanak kapcsolatot a hálózat magasabb rendű elemével. A rendszer alkalmazása költség és energia hatékony megoldást kínál, továbbá a távvezérlés és távirányítás magasabb szintű eszközök mellett kisebb az emberi erőforrás igénye. Az adott hálózat bármikor tovább bővíthető ill. kiterjeszthető. A bővítés lehet akár ideiglenes működésű szenzorokkal is, melyeket a megfelelő információ begyűjtésére alkalmazunk. Az egyes mérőelemek vagy érzékelők pontos elhelyezését nem szükséges előre definiálni, telepítésük bárhol lehetséges, ha figyelembe vesszük a hálózat felépítésének algoritmusát. Ez lehetőséget biztosít arra is hogy krízis helyzetben egy adott terület megfigyelésére ideiglenesen működő szenzorokat szórunk ki repülőből vagy helikopterből. Az ilyen típusú mérőelemek energiaellátását természetesen akkumulátorról, vagy elemről lehet biztosítani, ezért fontos kérdés a hálózat energia szükséglete. A szenzorhálózat nagyszámú több száz vagy több ezer elemet is tartalmazhat. Az esemény vagy jelenség melyet detektálni kell az adott feladat függvényében kerül meghatározásra és ennek megfelelő mérőeszköz kiválasztását teszi szükségessé. Emiatt a hálózatban olyan protokollokat és működési algoritmusokat kell alkalmazni, melyek lehetőséget biztosítanak a hálózat önszerveződő képességének megvalósítására.

A SZENZORHÁLÓZAT STRUKTÚRÁJA

A hálózat elemeit szenzorok vagy mérő berendezések, nyelők vagy adat feldolgozók és továbbítók, ill. adatfeldolgozó és vezérlő központok alkotják.

A szenzorok magukba foglalják a katonai felderítő és célmegjelölő lokátorok különböző típusait, a polgári légtér ellenőrző és légi irányító lokátorokat, a speciális ideiglenesen vagy folyamatosan üzemelő szenzorokat és mérő elemeket. Az adott feladat függvényében alkalmazhatók a hálózatban ideiglenes működésű szenzorok és mérőelemek is, melyek bármilyen fizikai mennyiség detektálására és mérésére alkalmassá tehetők, úgymint: hőmérséklet, sugárzás vagy egyszerűen csak behatolás detektálás. A hálózatba szervezett és így üzemeltett rádiólokátorok felderítési és célkövetési tulajdonságai egyértelműen meghatározhatók. A hálózat üzemű lokátorok alkalmazása esetén m számú adó és n számú vevő üzemeltetése lehetséges. Végeredményben a teljes hálózat szinkron működése biztosítható, ezáltal a hálózat bármely vevő berendezése képes együtt működni a hálózat bármely adó berendezésével. A hálózat elemei monosztatikus és bisztatikus elrendezésűek lehetnek.

A nyelők vagy adatfeldolgozók és továbbítók összegyűjtik a mérőcsoportok jeleit, részleges adat egyeztetést és jelfeldolgozást hajtanak végre, majd ezeket továbbítják az adatfeldolgozó és vezérlő központok felé. A közbelső adatfeldolgozás során jelentős mértékben csökken a hálózatban továbbítandó adatmennyiség, ezáltal növekszik a hálózat működési sebessége valamint javul az energiafelhasználás igénye.

Az adatfeldolgozó és vezérlő központok a beérkező adatokat automatikusan feldolgozzák és az eredmény függvényében vezérlik a végrehajtó szerveket a beavatkozásra. A vezérlő központok vagy bázis állomások nagy számítási kapacitású hálózati eszköz. Több adatfeldolgozó és vezérlő központ elhelyezése lehetséges a hálózatban, amelyek között koherens adatkommunikáció valósul meg. Ezen állomások különböző prioritásúak lehetnek. Amennyiben a hálózat hat több vezérlő központot is tartalmaz, minden esetben meg kell különböztetni egy elsődleges prioritású központi vezérlőt. Több vezérlő alkalmazása esetén az információ eljuttatásának célja lehet egy időben több központ felé is. A bázis állomás lehet fix telepítésű ill. mobil. A mobil bázisállomások alkalmazása adott esetben növelheti a hálózat robosztusságát és csökkentheti az információ késleltetést.

A hálózatokban előfordulhat kommunikáció kimaradás, mely azt eredményezi, hogy az elemek nem találják az adott vezérlőt a hálózatban, például a vezérlő áttelepülése alatt. Ilyen esetekben biztosítani kell az információ másik vezérlőre irányítását, vagy várakoztatását.

A bázisállomásoknak rendelkezniük kell megfelelő teljesítményű adóval, vevőérzékenységgel és antennával vagy antennarendszerrel, az adott hálózati szekció lefedéséhez. Ebben az esetben nincs szükség szenzorcsomópontok vagy lokátorok közötti útvonalválasztásra.

Az ilyen hálózatok különböző működésűek lehetnek. Ezek a hálózatok a hálózathoz való hozzáférés, vagyis az adatküldés szerint három nagy csoportba sorolhatóak:

- Time-driven - idővezérelt hálózatok

- Event-driven – eseményvezérelt hálózatok
- Query-driven – kérdés- vagy lekérdezés-vezérelt hálózatok

Az idővezérelt hálózatokban minden mérőelem (szenzor, lokátor, felderítési pont) elküldi adatait a nyelő felé. Az esemény vezérelt hálózatban csak akkor küldenek adatot a mérőelemek ha valamilyen eseményt érzékelnek, vagy a legutolsó rögzített állapothoz képest változás állt be. Természetesen ehhez az adatok folyamatos tárolása szükséges. A lekérdezés vezérelt hálózatban a mérőelemek csak akkor küldenek adatot, ha a vezérlő vagy nyelő lekérdezi a mérőelemeket. A hálózatokat a működésük alapján különböző energiafelhasználás, pontosság és hálózati sebesség jellemez.

A mérő elemek, szenzorok lehetnek fix telepítésűek és mobil képességekkel rendelkezők. A mobilitást alapvetően a katonai rendeltetésű eszközök biztosítják. A mobilitás bizonyos típusoknál alapvető igény. Mozgatásuk különböző megoldásokkal valósítható meg: felszerelhetők repülőkre, járművekre, vagy program szerint vezérelhető robotokra, esetleg műholdakra. Lehetőség nyílik a nyelők és adatfeldolgozó központok mobil kivitelű alkalmazására is. Ezek elhelyezése szintén történhet földi vagy légi járművön. A mozgás lehet vezérelt vagy véletlen szerű. Mindkét esetben szükséges a folyamatos kommunikáció biztosítása.

KOMMUNIKÁCIÓ A HÁLÓZATBAN

A kommunikáció történhet vezetéken illetve vezeték nélkül. A távolságok és mozgásigény alapvetően a vezeték nélküli kommunikációt teszi szükségessé. A vezeték nélküli kommunikációhoz használt vivő frekvencia optimális megválasztására nagy hangsúlyt kell fektetni, hiszen a mikrohullámú tartomány lényegesen nagyobb sávzsélességet rejt magában, ugyanakkor a méteres tartomány terjedési tulajdonságai miatt különböző terepviszonyok mellett is megvalósítható a megfelelő kommunikáció.

A kommunikáció során alapvető a jelek összekeveredésének elkerülése, hiszen ugyan azon csatorna használata esetén az információk időben átlapolódhatnak. Ilyen esetekben az információ újra bekérése és küldése válik szükségessé, ez jelentős idő és energia pazarlást okoz. A vezérlők egyik feladata a közeg hozzáférés vezérlése, mely biztosítja a kommunikációs csatorna kiosztását is. A kiosztás lehet statikus vagy dinamikus. Ez az eljárás alapvetően a multiplex rendszer használatát jelenti.

A kommunikáció megosztás lehet:

- időosztásos (TDM)
- frekvenciaosztásos (FDM)
- kódosztásos (CDM)

A három módszert természetesen lehetőség van kombinálni. Időosztás alkalmazása esetén a kommunikáció precíz megvalósításához nagy pontosságú rezgéskeltőket kell használni és biztosítani kell a hálózati elemek együttfutását.. A statikus kiosztás ronthatja a forgalom kihasználtságot, különösen sok változó számú ill. mobil elem esetén. A dinamikus csatornakiosztás jól illeszkedik a változó igényekhez. A hozzáférés lehet szinkron vagy aszinkron melyek közül az aszinkron hozzáférés

a lehetőségek szélesebb spektrumát kínálja. Az ilyen hálózatokhoz jól illeszkedik csillag hálózati topológia. Külön csatornát lehet rendelni a be- és kimenő forgalomhoz. Ütközés esetén a hálózat elemei újra próbálkoznak. Nagyobb kiterjedésű szenzorhálózatok esetében a csillag topológia nem tudja teljesíteni a követelményeket.

Jobb megoldás kínál CSMA vezérlés, melynek lényege, hogy minden eszköz adás előtt ellenőrzi a csatornát belehallgatással, és csak akkor kezdi el adását, ha a csatorna szabad. A vezeték nélküli hálózatoknak különleges követelményeknek kell megfelelniük.

A hálózaton belüli kommunikációnál meghatározó a protokoll körütekintő megválasztása. Lehetőséget kell biztosítani a hálózatban több protokoll alkalmazására is. Az alkalmazott protokolloknak mindenképpen biztosítani kell:

- az üzenetek torzítás mentes továbbítását
- címezés azonosítást és cím fordítást
- vezérlőjel továbbítás
- periódus figyelést
- az ütközések és áthallások elkerülését

Az útvonalválasztó protokollok rendelkeznek ortogonális működési tulajdonságokkal úgymint:

- Bázis és szenzorok, szenzorok és bázis, valamint szenzor-szenzor közötti kommunikáció
- Csomópontok állapot jelentése
- Robosztus kézbesítési módszer támogatása
- Hierarchikus protokoll
- Riport modell
- Szomszéd választás
- Elemek és csomópontok helyének számítása

A bázis-szenzor kommunikáció azt a képességet jelenti hogy a bázis közvetve vagy közvetlenül képes a szenzornak üzenetet küldeni. A szenzor-bázis kommunikáció alatt azt értjük, hogy a minden szenzor képes közvetlenül vagy közvetve üzenetet küldeni minden bázisnak, mely lehet unicast (egy-egy), multicast (egy-több), reverse-multicast (több-egy), valamint anycast (egy-bármely).

SZENZOROK ÉS MÉRŐELEMENK SZERVEZÉSE

A mérőberendezések és szenzorok elhelyezése lehet determinisztikus, vagy a mobilitásból adódóan véletlenszerű. A mérőelemek és szenzorok véletlenszerű telepítése csökkenti a hálózat kezelhetőségét és vezérelhetőségét. Éppen ezért célszerű valamilyen logikai topológia kialakítása. A szenzorok és mérőelemek csoportokba foglalása a, illetve klaszterbe szervezése lényegesen jobb skálázhatóságot és egyszerűbb adatfeldolgozási eljárást tesz lehetővé.

A klaszterszervezésnél minden szenzor illetve mérőelem tagja egy, de indokolt esetben több klaszternek is. Minden klasztert rendelkezik egy vezérlővel mely összefogja a mérőelemek működését. A klasztervezérlőnek rendelkeznie kell a szomszédos vezérlőkkel való kommunikációs képességekkel is. Ezen kívül lehetőség nyílik arra is, hogy a mérőelem vagy szenzor vezérlő funkciókat is ellásson. Az ilyen struktúrában a mérőelemek az adataikat nem a központi vezérlőbe (nyelőbe) küldik, hanem vagy a szomszédos elemen keresztül, vagy direkt úton a klasztervezérlőnek. Ide érkezik be a klaszter összes mérőelemének jele, melyet a vezérlő összefog egyetlen adatcsomaggá. Ez a csomag kerül továbbításra a központi vezérlőbe.

A hálózati útvonal célszerű megválasztásával jelentős idő és energia megtakarítást lehet elérni. A mérőelemek az információt juttathatják közvetlenül egy nyelőre, vagy a bázis állomásra. Ebben az esetben single-hop vagyis egyugrásos hálózati szerveződésről beszélünk. Amennyiben az elemek elhelyezkedésének figyelembevételével egy arra alkalma másik mérőelemen keresztül történik az információ nyelő vagy bázisállomásra juttatása multi-hop több-ugrásos. Ez a megoldás történhet akár több lépcsőben is. A hálózati rétegnek biztosítani kell a hálózat bármely két eleme közötti kommunikációt. Alkalmazhatunk ad-hoc hálózati útvonal választó eljárást is ugyanakkor fontos követelmény a hálózat önszerveződő jellegének biztosítása, mivel a mérő elemek autonóm módon is képesek működni. Ezek figyelembevételével tehát olyan útvonalválasztó algoritmust célszerű választani, amely biztosítja a hálózat önszerveződését és követni tudja a topológia változásokat is.

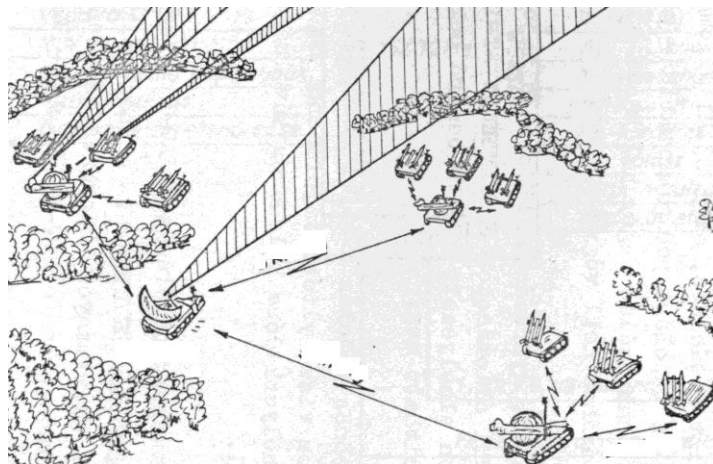
A hálózatban mobil mérőelemek alkalmazása elkerülhetetlen. A mobilitást egyrészt a megoldandó feladat határozza meg, másrészt a mérőeszközök felderítése és oltalmazása is indokolja. A mérőelemek mozgatása során a cél, hogy a megváltozott stratégiai helyzet függvényében a hálózat által felügyelt terület lefedettségének növelése, javítása. A mozgatás során abból indulunk ki, hogy a mérőberendezések ismerik geodéziai vagy GPS koordinátáikat, feltételezzük hogy rendelkeznek GPS vevővel, vagy más nagyhatékonyságú lokalizációs algoritmusnak köszönhetően. A protokoll szerint a telepítés után minden szenzor elküldi szomszédainak saját koordinátáit, majd ezen információ alapján az érzékelők kiszámítják a hozzájuk tartozó Voronoi tartományokat (ez azoknak a pontoknak a halmazát jelenti, amelyek az adott érzékelőhöz vannak legközelebb). Amennyiben a szenzor érzékelési sugara kisebb, mint a Voronoi tartománya valamely pontjának tőle mért távolsága, úgy ott a lefedettségben rés van, hiszen ő az ahhoz ponthoz legközelebbi érzékelő, de neki is a hatókörén kívül esik.

A javasolt algoritmus feltételezi, hogy a hálózat minden eleme ismeri saját térbeli elhelyezkedését, valamint a bekövetkező események helyéről a hálózat összes eleme értesül. A hálózat eleme kétféle algoritmus alapján mozoghatnak. Az egyik esetben a hálózat eleme a saját korábbi helyeinek és az események helyének függvényében meghatározza, hogy merre mozog. A másik esetben a hálózat eleme következő helyének megállapításánál az esemény korábbi helyeit - amit egy eloszlás függvény segítségével tárol - is figyelembe veszi. Amennyiben az összes hálózati elem az események gyakori felbukkanási helyére mozognak, akkor a hálózat bizonyos területei lefedetlenek maradnának. Ezt elkerülendő, miután a hálózat elemei elmozdultak korábbi helyükről, folyamatosan felderítő

üzeneteket küldenek szomszédaiknak. Figyelik a beérkező válaszüzenetek irányszögeit, és ha valamelyik térrészből nem kapnak ilyen üzenetet, akkor azon rész felé mozdulnak el, így biztosítva a lefedettséget ott is.

A KÖZEGCSILLAPÍTÁSBÓL ADÓDÓ KOMMUNIKÁCIÓS PROBLÉMA A HÁLÓZATBAN

A szenzorhálózat elemeinek (rádiólokátorok, érzékelők, rakéta és tüzér alegységek) működését különböző terepviszonyok között kell biztosítani. A hálózat elemeinek a kommunikációja kulcs kérdés, ám ez nem mindig fedetlen terepen valósul meg. Fedett terepen a kapcsolat megteremtés jelentősen nehezíti a tereptárgyak, különböző domborzati viszonyok és a növényzet. Ezeknek a figyelembevételéhez azonban meg kell vizsgálnunk a különböző közegek különösképpen a növényzet által képviselt hatásokat az elektromágneses hullámterjedés szempontjából. Ezeket a hatásokat először célszerű elméleti síkon megközelíteni, hogy valamilyen becslést kapjunk a várható folyamatokról.



A legcélszerűbb a hullámterjedés matematikai leírásán keresztül modellezni a speciális közegen keresztül történő terjedést. Különböző összetett közegek csillapítását matematikai modellekkel leírni nagyon nehéz bár nem lehetetlen. Néhány modell azonban felhasználható olyan esetekre, amikor az elektromágneses hullám egy összetett (pl. lombos) közegen keresztül terjed, többszörösen szóródva és elnyelve. A modellek közül néhány úgy kezeli a növényzet minden komponensét mint önálló reflektáló elemet és meghatározzák a hozzá tartozó alakot és dielektromos állandót, míg más modellek úgy kezelik a közeget, mint a reflektáló elemek heterogén együttesét, melyeknek alakja és elhelyezkedése tetszőleges. Mivel egy matematikai modell általános, a paramétereit az adott növényzetnek megfelelően kell behelyettesíteni. A növényzet ilyenfajta paramétereit viszont nem állnak rendelkezésünkre ezért azokat jól megalapozott becslések, vagy mérések alapján határozhatjuk meg. Alapvetően két modellre támaszkodva lehet elvégezni a számításokat. Az egyik a törzsek, ágak és tűlevelek modellezésével foglalkozik elsősorban (Rayleigh modell). A másik a lombos közeget modellezi. Mielőtt azonban bármelyik modellbe is belemélyednénk tekintsük át azokat a tényezőket

amelyek jelentős hatással vannak a fák lombozatán keresztüli hullámterjedésre. A jellegzetes erdőkre vonatkozó lombsűrűség és az erdő alkotóelemeinek (fa és levelek) elektromos tulajdonságai.

A nem-folytonos, véletlen elrendezésű közegeken keresztüli hullámterjedésre alkalmazandó elméletek és bármely egyéb olyan hullámterjedési mérés, amely betekintést nyújt a lombozat fáziskésleltető illetve csillapító hatásába.

A fentiek alapul szolgálhatnak egy modell kialakítására. Lombsűrűség az a térfogatrész, amelyet a lombozat alkotóelemei elfoglalnak. Azaz a lombozat által elfoglalt térfogatnak az össztérfogathoz viszonyított aránya. Ez az információ ritkán áll rendelkezésre és így azt hagyományos erdőstatistikákból becsléssel kell megállapítani. Egy modellt alakítottak ki [Brown és Curry, 1980] az erdőt alkotó fafajtákat jellemző térfogatrészek becsléses megállapításához. Általában azt tapasztalhatjuk, hogy viszonylag kifejtett erdők esetében a fa az össztérfogat mintegy 0,1%-át foglalja el, míg a levelek illetve a fenyőtűk az össztérfogat kevesebb, mint 0,01%-át foglalják el. Bizonyos kivételes esetekben, mint pl. a kelet-európai jól kezelt, kifejtett erdők esetében, a fa akár 0,5% is lehet; mindemellett ez csupán kivételes eset. Általában véve egy erdős, bokros, cserjékkel fedett terepen a fák és a levelek térfogatrésze meglehetősen kicsi, így ez gyér sűrűségnek tekinthető. A fa összetett relatív dielektromos állandójának, $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$, viselkedése meglehetősen bonyolultán írható le. Mindamellet az ϵ'_r a beeső elektromos mező polarizációjához viszonyított faerezettség elrendezésének, a fafajtának (kemény- vagy puhafa), sűrűségének, nedvességtartalmának és hőmérsékletének a függvénye. Általában véve az ϵ'_r -re nagyobb érték adódik, amikor az elektromos erőter párhuzamos a faerezettség irányával. A puhafának nagyobb a relatív áteresztőképessége mint a keményfaké és az ϵ'_r csaknem egyenes arányban nő a nedvességtartalommal. Az ϵ'_r a hőmérséklet függvényében történő változása általában csak fagypon közelében jelentős. A következő számok becsléseket adnak az ϵ'_r értékére a faerezettség irány és a fa fajták függvényében. A faerezettséggel párhuzamos elektromos mezők esetében:

- Puhafa: $48 < \epsilon'_r < 68$
- Keményfa: $30 < \epsilon'_r < 53$

míg a faerezettség irányára merőleges elektromos mező esetében:

- Puhafa: $37 < \epsilon'_r < 54$
- Keményfa: $13 < \epsilon'_r < 28$

Az ϵ'_r veszteségi tényezőnek a frekvencia, az adott fafajta és évszak függése kevésbé ismert. Használható veszteségi tényező-méréseket rendkívül nehéz végrehajtani a mérést zavaró hatások miatt.

Törzsek, ágak és tűlevelek modellezése

A gyér sűrűségű levélzet tekintetében a nem-folytonos, véletlenszerűen elrendezett közegeken keresztül történő hullámterjedésre vonatkozó Flody-Twersky-féle elméletet használható arra, hogy a

koherens mezőre vonatkozó komplex terjedési állandót megkapjuk. Különböző mérések alapján a jellemző erdő és lomb komponenseket Rayleigh modellként kell figyelembe venni, ami a szórási és elnyelési jellemzőket illeti. A Rayleigh-komponenseket magában foglaló hatásos lomb térfogatrészt a frekvencia függvényeként kerül megszerkesztésre, az erdőállományra vonatkozó adatok felhasználásával. A törzsek és ágak modellezése Rayleigh-hengerek formájában történik. Ehhez a vizsgálathoz a leveleket, csekély ösztérfogatuk miatt, figyelmen kívül hagyjuk. A modell nem alkalmazható olyan frekvencia fölött, amelynél a hatásos térfogatrészt nullára adódik. A modell jó egyezést mutat a terjedési mérésekkel. Az itt követett módszer az, hogy egy nagyon egyszerű modellel kezdünk és azt szükség szerint módosítjuk. Ezen eljárásnál abból a feltételezésből indulunk ki, hogy sokkal egyszerűbb kimutatni hogy, hol nem megfelelő a modell, mintsem egy összetettebb modellt vizsgálni, amelyre vonatkozóan még bizonyos alapvető fontosságú kiindulási adatok sem állnak rendelkezésre. Az így kialakított modell a következő elveken alapul:

- nem-folytonos, véletlenszerű hullámterjedési elméleten kell alapulnia,
- a lombra vonatkozó ismert elektromos és statisztikai adatokat kell felhasználnia,
- jó minőségű terjedési mérések eredményeit kell magában foglalnia
- olyan paramétereket kell felhasználnia, amelyekre vonatkozóan mérések illetve megalapozott becslések állnak rendelkezésre.

A modell a Foldy-Twersky-féle elméleten alapszik, amely egy gyér telepítettségű, nem folytonos, véletlenszerű elrendezésű közegen keresztül történő koherens hullámterjedésre vonatkozik. Stutzman és mások mérései alapján feltételezzük, hogy a terjedési problémát illetően a levélzet jellemző alkotóelemei elég kicsinyek ahhoz, hogy Rayleigh-modellként ne kelljen figyelembe venni azokat. Ha hosszú, vékony Rayleigh-hengereknek vesszük a törzseket, ágakat és fenyőtűket (erdei fenyők illetve fenyőfák esetében), akkor a probléma az alkotóelemek elrendezettségére vonatkozó valószínűség sűrűségi függvény becslésére szűkül le. Ezen okoknál fogva ezt az elméletet Rayleigh-féle hatásos térfogat-modellnek (REV-modellnek) nevezzük. Ez a modell a 100 MHz - 10GHz-es tartományban használható. Az ϵ'_r veszteségi tényező 600MHz-10GHz-ig terjedő tartományban elsődlegesen kétpólus vagy Debye-féle relaxációs veszteséget jelent, amelyet a fában lévő víz okoz. A vízben lévő szennyeződések a következő hatásokat idézhetik elő: a Debye-féle jelleggörbe középfrekvenciájának eltolódása, a cellulóz-víz keverék miatti lehetséges többszörös, rezonáns veszteségek és a Debye-féle alapjelleggörbe kiterjedésével együtt történő amplitúdó csökkenés. Ez tovább bonyolítja a problémát. A rendelkezésre álló adatok az ϵ'_r -től való következő függőséget eredményezték:

$$\epsilon''_r = \frac{A}{f^{0,96}} + \frac{B(f/f_c)}{1+(f/f_c)}$$

Ahol $A \approx 1,5 \cdot 10^9$ az erezzettel párhuzamos elektromos erőter esetében és $A \approx 4 \cdot 10^8$ az erezzetre merőleges elektromos erőter esetén, f az adott frekvencia (Hertzben kifejezve), f_c a Debye-féle középfrekvencia (szintén Hertz-ben megadva). Nyáron vagy 25°C -tő csak kis mértékben eltérő hőmérséklet értékek esetén $f_c \approx 20$ GHz, míg fagyponthoz közeli hőmérséklet esetén $f_c \approx 10$ GHz.

Rayleigh-féle hatásos térfogat-modell

Ezzel a modellel a terjedési probléma szempontjából a közbenső fának csak azon részét kell figyelembe venni, amelynek átmérője $\lambda_0/2$ -nél kisebb. A leveleket csak a leveles fák esetében nem kell figyelembe venni, mivel ezek az össz-levélnet térfogat 10%-ánál kevesebbet képviselnek. A 7 cm-nél nagyobb átmérőjű fák térfogatszázalékára vonatkozó, néhány korlátozott adatnak a famagasság, erdőállomány táblázati adatok és az elektromágneses hullámterjedésre vonatkoztatott hatásos térfogati rész, $\{pV_p\}_{ew}$ becsléses megállapításához szükséges modell függvényeként történő felhasználásával volt lehetőség fogalmat nyerni arra vonatkozóan, hogy a $\{pV_p\}_{ew}$, hogyan viselkedik a szabad térben terjedő λ_0 hullámhossz függvényében. Megfigyelések szerint 3 GHz-nél a fa teljes térfogatrészének kevesebb mint 30%-a tartalmazza a $\{pV_p\}_{ew}$ -et. Így, 3 GHz esetén a fa hatásos térfogatrésze csak 3-szor akkora mint a levéltérfogat, és ennél fogva a levelek szerepe 3 GHz fölött megnő, mivel a $\{pV_p\}_{ew}$ tovább csökken, míg a levéltérfogat állandó marad. A fa hatásos térfogatrészének megszerkesztésénél a $D/\lambda_0=0,5$ vettük felső mérethatárként. A törzsek vagy ágak zöme $\{pV_p\}_{ew}$ -ben ennél kisebb átmérővel rendelkeznek. Ennél fogva a $\{pV_p\}_{ew}$ -t alkotó ágak és törzsek tömegét hosszú, vékony Rayleigh-hengereként lehet modellezni. .

Ha a tárgyak elég kicsik valamely hullámhossz vonatkozásában, azaz Rayleigh-k, és ha ezek bizonyos kanonikus alakzatokkal modellezhetők

Figyelembe kell venni, hogy a törzsek és ágak nem mind ugyanolyan irányban helyezkednek el. Mivel a fák teherhordó részének, (törzsek középső ágak) zöme függőlegesen helyezkedik el. A többi ágat azonban egy 4° térszöget meghaladó csaknem egyforma véletlenszerűséggel kell elrendezni. Ennél fogva ha a frekvencia alacsony az összes fa összetevő szerepel a $\{pV_p\}_{ew}$ -ben. A valószínűség-sűrűség függvénynek, a törzsek és az ágak elrendezése vonatkozásában, a függőleges felé kell kitérnie. Ez azért van, mert a törzsek alakítják a $\{pV_p\}_{ew}$ egy lényeges részét és ezek csaknem mind függőleges elrendezésűek. Amint a frekvencia növekszik és a nagyobb faösszetevők, mint pl. a törzsek, kiesnek a $\{pV_p\}_{ew}$ -ből, a valószínűség-sűrűségi függvények a fennmaradó összetevők vonatkozásában csaknem egyenletesnek kell lennie. A következő egy olyan valószínűség-sűrűség függvény, amely egyenletes véletlenszerű elrendezésre vonatkozik:

$$P_{ew}(\Omega)d\Omega = \frac{d\Omega}{\pi^2 \sin\theta} \quad 0 \leq \Omega \leq 2\pi$$

$$p_{ew}(\Omega)d\Omega = 0 \quad 2\pi \leq \Omega \leq 4\pi$$

ahol a $d\Omega$ térszögműlönözétét a $d\Omega = \sin\theta \, d\theta \, d\phi$ vonatkoztatja θ -ra és ϕ -re. Ha az elektromos erőtérre vonatkozó kifejezést az (x, y, z) koordinátákra transzformáljuk, és megszorozzuk a valószínűség sűrűség függvényével, majd átlagoljuk, akkor megkapjuk a beeső és belső erőtér közötti átlagolt arány megfelelő elrendezését. Az eredményt ezután behelyettesíthetjük az átlagos erőtér terjedési állandójának összefüggésébe, hogy megkapjuk a "k" értékét. Ezeket egyszerűsítjük, annak figyelembe vételével, hogy $\{pV_p\}_{ew} \ll 1$ és $|E_r| \gg 1$:

$$k_{V,H} \approx k_0 + k_0 \left\langle \frac{1}{V_p} \right\rangle (\epsilon_r - 1) / 6$$

Idáig a szórás hatásokat nem vettük figyelembe. A szórás hatások belefoglalása a következő összefüggést eredményezi:

$$k^2 \approx k_0^2 \left\{ 1 + \left\langle \frac{1}{V_p} \right\rangle (\epsilon_r - 1) \cdot (2q) \cdot \left[1 - j \frac{k_0^3 \langle V_p^2 \rangle |\epsilon_r - 1|^2}{6\pi \langle V_p \rangle (\epsilon_r' - 1)} \right] \right\}$$

ahol a "q" az előbbi összefüggésben szereplő 1/6 tényezőnek felel meg, míg a $\langle V_p \rangle$ a törzs- illetve ágterfogat másodrendű nyomatéka. Sajnos új statisztikai jellemző került bevezetésre, nevezetesen a $\langle V_p \rangle$ amelyre vonatkozóan nem áll rendelkezésre információ. Ezen túlmenően nem valószínű, hogy bármely ilyen jellegű információ valaha is rendelkezésre áll majd. E probléma megkerüléséhez durva közelítés, miszerint a szögletes zárójelben lévő második tag kompenzálja a kvázisztatikus közelítésben szereplő belső erőtér kis imaginárius részének figyelmen kívül hagyását. Tudjuk, hogy annak az 1-hez képest kicsinek kell lennie. Ezért ezt egyszerűen 0,1-del egyenlőnek vesszük, hogy nagyon durva felső határértéket kapjunk. E közelítéssel számítás szerint a terjedési állandó, amely a szórás veszteségeket is magában foglalja, a következő:

$$K \approx k_0 \left\{ 1 + \left\langle \frac{1}{V_p} \right\rangle (\epsilon_r - 1) \cdot q \left[1 - j/10 \right] \right\}$$

a "k" imaginárius része:

$$\text{Im}(k) = -k_0 \left\langle \frac{1}{V_p} \right\rangle q \left[\epsilon_r'' + (\epsilon_r' - 1)/10 \right]$$

A K meghatározására vonatkozó összefüggés és az ahhoz vezető logikai alap alkotja azt, amit Rayleigh-féle hatásos térfogat (REV) modellnek neveznek, és amely erdőn keresztüli koherens hullámterjedésre vonatkozik.

A növényzetet az elektromágneses hullámterjedés szempontjából úgy lehet közelíteni, mint két vagy több különböző típusú dielektromos szórással rendelkező közeg, véletlenszerűen elhelyezkedő geometriai alakzatát. Ez a közelítés a növényzetet úgy kezeli mint egy olyan folyamatos közeg, amely közegen keresztüli hullámterjedést, az ε^* effektív dielektromos állandó határozza meg. A modell az elektromágneses hullám terjedési veszteségét figyelembe veszi egy komplex elektromágneses szóródási modellel annak ellenére, hogy a vegetáció jelenléte bonyolulttá teszi a feladatot. A modell a lombos közeg egy ε^* effektív dielektromos állandóval jellemzett folyamatos közeggel közelíti. Az effektív dielektromos állandó használata lehetővé teszi, hogy a különböző nemű véletlenszerűen elszórt részeket úgy kezeljük mint egy homogén közeg. A lombos közegben a különböző nemű keverékek alatt természetesen a leveleket, levélszárakat, gallyakat esetleg virágokat (virágzás idején) értjük. A különböző nemű keverékek jellemzőit a növényzetek fajtái és elhelyezkedésük határozzák meg. Ezeket a megállapításokat alkalmazták számos modellben a többszörös szórású közegek közelítő leírásánál, amely módszer a növényzet ε^* értékének becslését könnyen mérhető mennyiségekre alapozza, úgymint a lomb sűrűsége és a lombot alkotó alapelemek dielektromos tulajdonságai. A modell alkotás során egyszerűsítéseket vezethetünk be. Egy általános egyszerűsítés, amely révén úgy vesszük figyelembe a növényzetet mint egy komplex dielektromos állandóval rendelkező lemezt, melynek vastagsága megegyezik a növényzet magasságával, vagy vastagságával. Amikor vizsgáljuk a növényzeten keresztüli terjedést és szórást, használhatjuk azt a kísérleti tényt melyszerint a lomb által elfoglalt térfogati rész rendszerint kisebb mint 5%, tehát a lomb ritka.

A szórás összegzésében a leveleket és ágakat összekötő levélszárakat el lehet hanyagolni mivel a lombos közegnek az elektromágneses energiára nézve sokkal nagyobb az elnyelése mint a szórása 50MHz és 3GHz közötti tartományban. Mivel a lomb ritka és inkább az elnyelés mint a szórás az elsődleges hatás, a lombos közegben a koherens térerő fog dominálni a szóródás eredményeképpen létrejött inkohereus térerővel szemben. A növényzeten belül a teljes erőter jellemezhető az alábbi matematikai kifejezéssel:

$$E = \langle E \rangle + \delta E_{fluc}$$

ahol: $\langle E \rangle$ átlag erőter

δE_{fluc} fluktuáló erőter mely 0 átlagértékű.

Az effektív paraméterek használata leírja egy növényzet környezetében az elektromágneses hullámok elnyelését és szórását bizonyos viszonyok mellett. A fenti közelítés az alábbi megszorításokkal igaz:

Az átlag erőtérek $\langle E \rangle$ sokkal nagyobbak kell lenni mint az ingadozási erőtérek δE_{fluc} melynek átlagértéke 0.

$$\langle E \rangle \gg \delta E_{fluc}$$

A hullámszámok közötti különbség, a hullámterjedés növényzeten keresztül illetve szabadterben kisebb legyen mint a (beágyazott) szórás reciproka

$$k - k_0 \gg \frac{1}{L}$$

ahol $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$; $k = k_0 \cdot \sqrt{\varepsilon^*}$ és L képviseli a (beágyazott) szórás maximális mértékét.

A fenti feltételek megléte esetén ε^* az elektromos erőter amplitúdó becsléséhez használható, amely erőter egy heterogén véletle elrendezésű közegen keresztül, egy bizonyos távolságra terjed (a térerőnek $e^{-j\omega t}$ időfüggését feltételezzük).

$$E = E_0 \cdot e^{j \cdot k_0 \cdot \sqrt{\varepsilon^*} \cdot Z}$$

ahol: E_0 - az elektromos térerő amplitúdója ,

E - az elektromos térerő a közegen keresztüli terjedés után,

ε^* - a közeg effektív komplex dielektromos állandója,

Z -a hullám közegen keresztül megtett távolsága

A bemutatott dielektromos modell jó becslést ad a lombon keresztül terjedő elektromágneses hullám szóródásáról és elnyeléséről. Az ε^* értékei meghatározhatók a következő két összefüggéssel bármilyen közegen történő terjedés esetén.

$$D(x) = \varepsilon(x) \cdot E(x)$$

$$\langle D(x) \rangle = \varepsilon^* \cdot E$$

Feltételezve egy tartományt vagy egy szóró közeg (σ), ahol az ($\varepsilon_0 = 1$) relatív dielektromos állandóval rendelkező szabadteret a σ magában foglalja, és tartalmaz még m számú különböző

beágyazott, relatív komplex dielektromos állandóval rendelkező szóró elemet, $\varepsilon_1 \dots \varepsilon_m$. A V_{ij}

$i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, N_j$, jellemzőket a σ részhalmazaként lehet definiálni, amelyek a j

egymásba ágyazott reflektáló elemek i osztályából állnak. Az összetett közeg dielektromos jellemzői a következőképpen határozhatók meg:

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_0 + \sum_{i=1}^m (\varepsilon_i - \varepsilon_0) \cdot \sum_{j=1}^{N_i} \chi_{V_{ij}}(x)$$

$$\chi_{V_{ij}}(x) = 1 \quad x \in V_{ij}$$

ahol:

$$\chi_{V_{ij}}(x) = 0 \quad x \notin V_{ij}$$

Tételezzük fel, hogy a δ_i dimenzió nélküli paraméterként szerepel, amely leírja az i osztályú elemi reflektáló részek egyedi aspektusait, úgy mint gömbszerűen szóró elemek sugarát, ahol is a p_i a teljes tér σ része, amely az $i = 1, \dots, m$ osztályú reflektáló elemeket foglalja magába. A σ térben adott egy visszaverődés a földről, a cél, hogy meghatározzuk az összetett rendszer szórási jellemzőinek határértékeit, $N_i \rightarrow \infty$, $\delta_i \rightarrow 0$, ahol p_i konstans. A lombkoronára mint közegre az ε^* - nak lehetséges a meghatározása, átmeneti operátorok alkalmazásával a különböző megközelítések levezetésében. Két ilyen elven alapuló megközelítést célszerű használni amely megfelelő eredményt biztosít. Az átlag T mátrix (ATA) közelítés a mezőt egyedi szóró centrumként, a többi szóró elemhez hasonlóan kezeli, de ezek belső kölcsönhatását nem vizsgálja. Ez a közelítési módszer csak $p \leq 0.02$ teljesítményszintnél alkalmazható és figyelmen kívül hagyja a rendszeren belüli szórási kölcsönhatásokat.

A koherens potenciál megközelítési módszer (CPA) amely, elhanyagolja a különbségeket a külső gerjesztésű mező és az átlag mező között, de tartalmazza a különböző reflektáló elemek közötti kölcsönhatásokat. A bemutatott modellek összefüggéseinek érdembeni alkalmazása számítógép segítségével lehetséges. Ha többszörösen beágyazott szóró alakzatok alkotnak heterogén közeget, a modell képes a volumetrikus frakciókon belül egyedi számításhoz, egyedi beágyazott szóró alakzat változtatására is. Az ATA és a CPA módszerrel kapott eredmények viszonylag jó egyezést mutatnak, de a különböző beágyazott szóró alakzatokra definiált modellek között lényeges eltérés tapasztalható. Az így meghatározott ε^* értékének változása viszonyul a beágyazott szórási alakzatok dielektromos állandóinak változásaihoz és ez minimális változást eredményez a $\text{Re}(\varepsilon^*)$ értékében, és egy kissé nagyobb az $\text{Im}(\varepsilon^*)$ értékében. Az (ε^*) értéke főként a beágyazott szóró elemek volumetrikus frakciójától függ. Néhány esetben az $\text{Im}(\varepsilon^*)$ értéke 2 nagyságrenddel is változhat attól függően, hogy szórványos jellegű, illetve sűrű erdőt vizsgálunk. A $\text{Re}(\varepsilon^*)$ nagysága szintén erősen függ a beágyazott szóró alakzatok által kitöltött térrész nagyságától, de ez a függés lényegesen kisebb fokú, mint az $\text{Im}(\varepsilon^*)$ hasonló jellegű függése. Az egyezés a CPA és az ATA technikák között felveti azt a kérdést, hogy milyen gyakoriak a többszörös szóródási folyamatok a vegetációs közegben. Az ATA nem számol a különböző szóródások közötti egymásra hatásával, míg a CPA ezeket is figyelembe veszi. Ha többszörös

szóródási kölcsönhatás dominál a közegen belül végbemenő folyamatban, akkor az ϵ^* számított értékeinél jelentős eltéréseket tapasztalhatunk az alkalmazott közelítési módszertől függően.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dirk H. Hoekman: Radar remote sensing data for application
- [2] Moise Ndoh, Gilles Y. Delisle Geolocation in Underground Mines Using Wireless Sensor Networks
- [3] Chin-Lung Yang, Saurabh Bagchi, and William J. Chappell, Topology Insensitive Location Determination Using Independent Estimates Through Semi-Directional Antennas
- [4] M. Vespe, C. Baker, and H. D. Griffiths Multi-Perspective Radar Target Classification
- [5] Radio Science, Volume 27, Number 6, November-December 199 Pages 797-812