

Магистърски курс "Анени за безжични комуникации"

Микровълнови антенни покрития (радоми) – видове, свойства и диелектрични параметри

Антенното покритие (RADOM; RAdar DOME) е радио-прозрачен материал за честотния обхват, където работи антената, който има за задача да защити от преки външни въздействия (климатични, механични и др.) намиращата се под него антена или антенен панел. Много често при проектиране на антени не се отчита влиянието на радома; той се проектира покъсно, добавя се към готовата антена и се разчита да не деградира силно характеристиките на цялата покрита антена. Оптималното проектиране на антени и особено на антенни решетки, обаче, изисква още на ниво предварителен дизайн да се отчете влиянието и на антенното покритие, още повече, че то се намира в близката зона на антената и на отделните елементи на антенната решетка. В тази част ще разгледаме някои проблеми, свързани със структурата на радомите, диелектричните им параметри и начина на измерване на затихването на сигнала в тях при нормално или косо падане на лъча.

Съвременни радоми – предназначение, влияние върху антената и основни типове.

Исторически радомите се появяват за нуждите на авиацията и за покриване на насочващите антени на бомби и ракети. Първите радоми са "тънки" (еднослойни); за ранните бомби дори се използват керамични антенни покрития. По-късно се появяват радоми от органични материали, а впоследствие – многослойни. Днес радомите главно са многослойни, които се проектират заедно с антената, но за по-евтини приложения продължава използването на еднослойни органични антенни покрития.

Двойното изискване към радома: да предпазва механично антената и да влияе слабо върху параметрите ѝ (освен в случаите, когато участва във формирането на антенния лъч) определя характера на двата типа (най-често противоречиви) изисквания към материалите, използвани за радоми: да е механично здрав и да е радио-прозрачен. Ще разгледаме някои от важните проблеми, свързани с радомите.

Влиянието на радомите се свързва основно със следните четири характеристики на антените, над които се поставят [6]:

- Изменение на посоката на главния лъч (bore-sight error). Става въпрос за много важно изменение – изкривяване на посоката на антенния лъч (ъгъла на приемане на сигнала) поради изкривяване на вълновия фронт след преминаване през диелектричното антенно покритие. Това може да е в резултат на геометрични ефекти (кривината на покритието) или поради промяна на диелектричната плътност. Този проблем е съществен при радарните и насочващите антени на самолети и ракети. При антените за безжични мрежи този проблем не е съществен, защото насочването на антената става по максимума на приетия (излъчения) сигнал, а не по геометрични симетрии.

- Нарастване на нивото на страничните листа (side-lobe level). Това е често срещан проблем след покриване на антената с радом. В резултат на многократните вътрешни отражения на сигнала вътре в антената води до нарастване на нивото на страничните листа. Ако проектирането на радома е неудачно, това означава възможности за приемане на паразитни сигнали чрез страничните листа на покритата антена, вместо с основния.

- Деполаризация (depolarization). Това е процес на прехвърляне на енергия (сигнал) от основната поляризация на антената към второстепенната. Причините са основно две: закривяване на повърхността на радома и диелектрична анизотропия на материала на покритието. Най-често този ефект се наблюдава при антени с кръгова поляризация. Например, ако антената е с дясна кръгова поляризация (RHCP), след преминаване през антенното покритие, част от сигнала променя поляризацията си в лява (LHCP), с което се

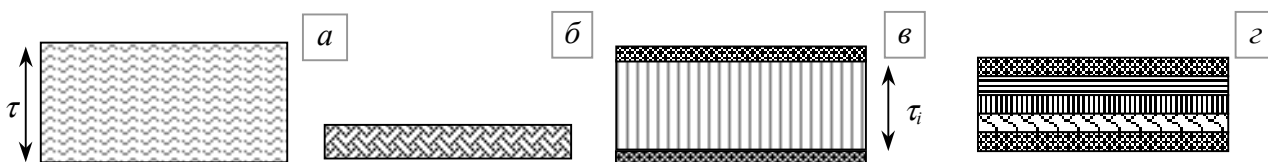
намалява изолацията между двете поляризации. Този проблем може да се окаже съществен при антени за безжични мрежи, особено при неправилно проектирано покритие.

◦ Внесени загуби от антенното покритие (Insertion losses). Накрая, присъствието на диелектрик със загуби над антената води до намаляване на нивото на сигнала поради многократно отражение и пречупване на сигнала през отделните слоеве на радома. Големината на тези загуби зависи от ъгъла на падане. Внесени загуби под 0.5 dB (в X обхвата) е нормално за добре проектирани антенни покрития. При дебели покрития със загуби или при неправилно проектирани покрития (със силни отражения), внесените загуби могат да нараснат недопустимо, което се отразява на намаляване на усилването на антената, увеличаване на нейната шумова температура и стесняване на честотната ѝ лента. При антените за безжични мрежи големите загуби в радома води и до намаляване на максималното разстояние, на което може да се покрива дадена връзка.

Както беше подчертано, съвременните радоми са предимно многослойни. Причината е, че с подходящ избор на параметрите на отделните слоеве може да се оптимизират параметрите на цялото антенно покритие – малки внесени загуби, широка честотна лента и др. Най-популярните методи за проектиране на антенни покрития се базират на геометричната и физичната оптика чрез пресмятане на комплексните коефициенти на преминаване и отражение. Част от тези методи са представени в работите [6-8]. В настоящия отчет те няма да бъдат разглеждани в подробности. По работата [9] има създаден авторски софтуерен продукт, чрез който може да се оценяват внесените загубите в едно- и три-слойни радоми, състоящи се от анизотропни диелектрични материали, при вертикална, хоризонтална и кръгова поляризация.

Подобно на други микровълнови устройства, радомите мога да се класифицират като ниско- и високочестотни, тесно- и широколентови и пр. Най-известната класификация е по структурата на диелектричния материал и слоевете от него – тип на радома. Най-разпространени са следните пет типа [6]:

- Тип А: Еднослоен радом с дебелина, кратна на полу-дължината на вълната;
- Тип В: Тънък еднослоен радом с дебелина, по-малка от 0.1 от дължината на вълната;
- Тип С: Трислоен радом с вътрешна сърцевина с ниска диелектрична проницаемост и два тънки външни слоя (покрития) с по-голяма диелектрична проницаемост (А-сандвич). Обратно, трислоен радом със сърцевина с висока диелектрична проницаемост и два външни слоя с по-ниска диелектрична проницаемост (В-сандвич)
- Тип D: Многослоен радом с повече от 5 различни слоеве с различни параметри (многослоен А-сандвич);
- Тип Е: Всички останали радоми, които не могат да се причислят към другите 4 типа.



Фиг. Д1.3 Най-разпространените типове радоми: а) тип А; б) тип В; в) тип С (А сандвич); г) тип D

Първият тип радоми (тип А) са дебели и еднослойни (т.е. състоят се от един и същи материал) – вж. Фиг. Д1.3а. Дебелината им τ се избира кратна на полу-дължината на вълната за средната честота в честотния обхват на антената $\tau = 0.5m\lambda/(\epsilon_r - \sin^2\theta)^{1/2}$, където λ е дължината на вълната в материала, m е цяло число, а θ е ъгълът на падане спрямо нормалата към повърхността на радома. Зависимостта от ъгъла на падане е силна, като тя е различна за перпендикулярна и успоредна на повърхността поляризация на сигнала. Големата дебелина на радомите от тип А води до два основни недостатъка: честотната лента е малка (под 5%), а

теглото на материала е голямо. Една алтернатива е използването на пено-образни, но достатъчно твърди материали. Радоми от тип А, особено ако са много дебели ($m > 1$), могат да изкривят недопустимо посоката на антенния лъч. Имат и някои предимства. За тези радоми (за паралелна поляризация) при ъгъл на падане, равен на ъгъла на Brewster $\theta_B = 1/\tan(\epsilon_r)^{1/2}$, се наблюдава нулево отражение внесенията загуби са изключително малки (зависят само от тангенса на диелектричните загуби).

Вторият тип радоми (тип В) са едни от най-разпространените при евтини ниско-честотни антени. Ако дебелината им τ е по-малка от 0.05λ , те имат поведение на ниско-честотни филтри: пропускат сигналите на ниски честоти с малки загуби, а имат по-високи загуби за сигнали на високи честоти. Тези радоми имат по-малки загуби за по-малки ъгли на падане; използват се практически за ъгли на падане от 0 до 70° .

Третият тип радоми (тип С) днес са най-разпространение високо-качествени радоми за различни приложения, особено при по-високи честоти. Те се състоят от три слоя: един вътрешен слой (сърцевина, core) с относително малка плътност и малка диелектрична константа ($\sim 1.05-1.5$) и два по-плътни тънки външни слоя с повишена механична здравина (покрития; skins). Това е т. нар. А-сандвич. Обратно, в някои приложения (но не при земни антени), се използва и В-сандвич с плътна сърцевина и по-малко плътни покрития. А-сандвич радоми имат много важно предимство – те имат най-голямата механична здравина при най-малко тегло. Ако са относително тънки (като радоми от тип В), те не работят при големи ъгли на падане. Ако са по-дебели, могат да се проектират като радоми от тип А, но са по-широколентови от тях. Във всички случаи, проектирането на трислойните радоми е доста по-трудно от проектирането на еднослойни.

Четвъртият тип радоми (тип D) са най-сложни за проектиране, защото съдържат повече от 5 различни слоеве с различни характеристики. Основните предимства на многослойните радоми са свързани с това, че при подходящ подбор на параметрите на отделните слоеве могат да се постигнат много по-добри характеристики от трислойните радоми: по-широка честотна лента (нараства с броя на слоевете), многоленовост (работа в няколко честотни обхвата едновременно), малки внесени загуби при не много големи ъгли на падане (поради минимизиране на отраженията), голяма здравина при малко тегло и пр. Тези радоми, обаче, имат един основен недостатък – при относително големи ъгли на падане внасят силни фазови изкривявания в сигнала и разстройват антенния лъч. Частично решение на този проблем са т. нар. С сандвич радоми, които представляват два сдвоени А-сандвич радоми. Този тип радоми изисква много по-прецизно проектиране, което води до по-силна зависимост на характеристиките от производствените толеранси и така се оказва неподходящ за масово производство.

За антени и антенни решетки в обхвата 3.5 GHz най-подходящи са тънките радоми от В тип или тънки трислойни А-сандвич радоми, проектирани като В-тип радоми.

Материали за антенни покрития. Съществува голямо разнообразие от материали, използвани за радоми (вж. [10]), включително и такива, които не намират директно приложение в електрониката (напр. някои материали, използвани в строителството, автомобилно- и самолето-строенето и др. области). В същото време далеч не всеки материал може да се използва за покритие на антена. Необходимите свойства на материал за радом могат да се разделят в две групи:

- Електрически характеристики;
 - Диелектрична проницаемост ϵ_r
 - Тангенс на диелектричните загуби $\tan\delta_\epsilon$
- Механични и климатични характеристики.
 - Механични характеристики като модул на огъване, здравина и твърдост;
 - Плътност на материала;

- Влагоустойчивост;
- Съпротивление на климатична ерозия
- Термоустойчивост

Ще съсредоточим вниманието си към първата група характеристики, защото те определят радио-прозрачността на радомите в определен честотен обхват.

◦ Органични материали (пластмаси) за еднослойни радоми. Тези материали са най-популярни за радоми от тип А при не много ниски честоти, но имат и приложения за тънки радоми от тип В, когато механичните характеристики не са толкова важни (напр., антени за безжични комуникации, основно in-door приложения). Данни за диелектричните параметри на такива материали са дадени в *Табл. Д1.4*. Диелектричната им проницаемост е типична за пластмасите – между 2.1 и 3.1. Това означава, че когато се изработва радом от тип А от тези материали за обхвата 3.5 GHz, дебелината им ще се окаже много голяма – 25-30 mm. Много по-често в такива случаи се използват тънки радоми от тип В с дебелини ~2-3 mm. Механичната им стабилност не е висока, но може да се подобри чрез придаване на специална форма на антенното покритие.

Табл. Д1.4 Диелектрични параметри на някои пластмаси за радоми в X-обхват

| Органичен материал без подсилване | ϵ_r | $\tan\delta_\epsilon$ |
|-----------------------------------|--------------|-----------------------|
| Rexolite | 2.54 | 0.0005 |
| Nylon | 3.1 | 0.017 |
| Teflon | 2.10 | 0.0003 |
| Polystyrene | 2.55 | 0.0004 |
| Plexiglass | 2.59 | 0.015 |
| Polyethylene | 3.1 | 0.0004 |

Табл. Д1.5 Диелектрични параметри на някои полимерни материали за пълнители в X-обхват

| Органичен полимер | ϵ_r | $\tan\delta_\epsilon$ |
|-------------------|--------------|-----------------------|
| Polyester | 2.95 | 0.007 |
| Bismaleimide | 3.32 | 0.004 |
| Polybutadiene | 3.83 | 0.015 |
| Epoxy | 3.6 | 0.04 |
| Polyamide | 3.1 | 0.0055 |
| Polycyanate | 2.86 | 0.005 |
| Polycarbonate | 2.7 | 0.006 |

Табл. Д1.6 Диелектрични параметри на някои ламиниращи материали за радоми в X-обхват

| Ламинирани материали | ϵ_r | $\tan\delta_\epsilon$ |
|---------------------------|--------------|-----------------------|
| E-glass | 6.06 | 0.004 |
| S-glass | 5.2 | 0.007 |
| D-glass | 4.0 | 0.005 |
| Kevlar | 4.1 | 0.02 |
| Quartz | 3.8 | 0.001 |
| Quartz Polycyanate cloths | 3.23 | 0.016 |

Табл. Д1.7 Диелектрични параметри на някои материали за сърцевини на радоми в X-обхват (Всички данни са от собствени измервания)

| Материали за сърцевини | ϵ_r | $\tan\delta_\epsilon$ |
|------------------------|--------------|-----------------------|
| Phenolic honeycomb | 1.1 | 0.001 |
| Kevlar honeycomb | 1.04 | 0.0015 |
| Plasticore honeycomb | 1.13 | 0.0014 |
| Airex foam | 1.2 | 0.0015 |
| Alveolit foams | 1.09 | 0.0002 |
| Foam PVC | 1.8 | 0.006 |
| 3D glass radome (core) | 1.75 | 0.008 |

◦ Ламинирани полимерни материали. Подобно на микровълновите подложки, материалите за радоми също могат да се подсилват чрез ламиниране с механично по-здрави материали. Това най-често се прави в два случая:

- За радоми от тип В чрез изработване на монолитен (еднослоен) материал с дебелина 1-5 mm, състоящ се от подсилваща тъкан и пълнител;
- За предпазни покрития (skins) за радоми от тип С (А сандвич) по същата технология но с много по-малка дебелина ~0.15-0.6 mm.

В *Табл. Д1.5* са представени диелектричните параметри на полимерни материали (смоли), използвани за пълнители, а в *Табл. Д1.6* – данни за най-често срещаните ламинирани материали. Полимерните материали имат диелектрична проницаемост в интервала 2.6-3.6, която е близко до диелектричната проницаемост 3.8 на кварцовите влакна на подсилващата материя и затова най-често се използват в тази комбинация. В общия случай, резултатната

диелектрична проницаемост ϵ_m на ламинираната тъкан се определя от израза $\epsilon_m = (V_R \log \epsilon_R + V_F \log \epsilon_F) / (V_R + V_F)$, където V_R и ϵ_R са обемът и диелектричната проницаемост на смолата, а V_F и ϵ_F – обемът и диелектричната проницаемост на фибро-нишките. Този израз е валиден за изотропни ламинирани материали.

◦ Материали за сърцевини на радоми. Както отбелязахме, най-популярни в микровълновия обхват са радоми от тип С или т. нар. А сандвич. За тях, освен разгледаните по-горе ламинирани покрития, са необходими още и специални материали с ниска диелектрична проницаемост и диелектрични загуби и с възможно най малка плътност и тегло, които се използват за сърцевина на радома (А сандвич). В *Табл. Д1.7* са дадени параметрите на някои от най-срещаните от тях.

Какво представляват тези материали за сърцевини (core). Най-добри параметри като сърцевина има въздухът, но подобен радом се реализира много трудно и само в известно приближение. Друг тип сърцевини с малка плътност са пено-образните (foam) органични пластмаси с различни пълнители. В зависимост от материала и от размера на въздушните балончета в него могат да се постигнат стойности на резултантната диелектрична проницаемост от 1.005 до стойността ѝ при съответния плътен материал. Тези материали са доста евтини, подобни на тях се използват в много области (напр. в строителството), но не винаги са достатъчно здрави и твърди. По-голяма здравина и устойчивост се получава, когато се използват сърцевини от материали с клетъчна структура – шестограми, цилиндри, специални плетеници и пр. Така се получава трислойни радоми от тип "пчелни клетки" (honeycomb radome). Тези радоми са изключително популярни в момента, защото съчетават свойства като малки внесени загуби дори на големи ъгли, широка честотна лента, малко тегло и достатъчно голяма здравина. Най-разпространени са хартиените пчелни клетки от кевларена хартия Nomex®.

◦ Технология на трислойни радоми (А сандвич). Най-използваните методи за изработване на трислойни радоми доскоро бяха следните: мокро формование (издуване) под вакуум и леене в автоклав. Мокрото формование не е лесен процес и за да се получат полимерни покрития с нужната дебелина, процедурата се повтаря няколко пъти. Затова днес се предпочита друг по-съвременен процес, който е приложим и за многослойните платки – бондиране (лепене) под натиск чрез залепващи (pre-preg) филми. При тази технология се използват предварително подготвени ламинати, с което много по-точно може да се контролира дебелината на покритието и да се намали проникването на смола с големи загуби навътре в сърцевината, с което деградират характеристиките на радома.

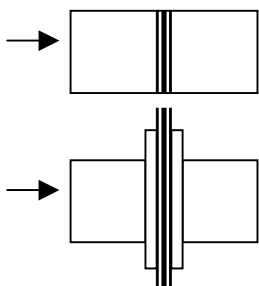
Измерване на затихване в радоми. Измерването на материали за радоми има два аспекта: измерване на диелектричните параметри на материалите за радоми (за всеки слой) и измерване на общите характеристики на радома като цяло (най-често това е честотната зависимост на затихването на сигнала в радома за различни ъгли на падане и различна поляризация на сигнала). Първият аспект на измерването касае проектирането на радома и е разгледан в следващата част отчета Д1.3. Вторият аспект е свързан с измерване на влиянието на радома върху параметрите на антената след проектирането. Ще разгледаме методите за измерване на затихването на сигнала в радома.

Най-директен е следният подход: измерва се коефициентът на усилване на дадена антена без и с радом за различни ъгли на приемане на сигнала. Така затихването на сигнала в dB е разликата между двете измерени стойности. Този метод е удобен с това, че може веднага да се установи влиянието на радома и дали то е приемливо или не за работата на самата антена. Основният недостатък е, че радомът трябва предварително да бъде произведен изцяло. Ако е проектиран добре, това не е проблем. Доста по-просто се установява затихването на сигнала през образец от радом, поставен в правоъгълен вълновод – *Фиг. Д1.4*. Това може да стане или като малък образец изцяло изпълва напречното сечение на вълновода или по-голям плоскопаралелен образец се поставя между фланците на два вълноводни отрязъка. И в двата

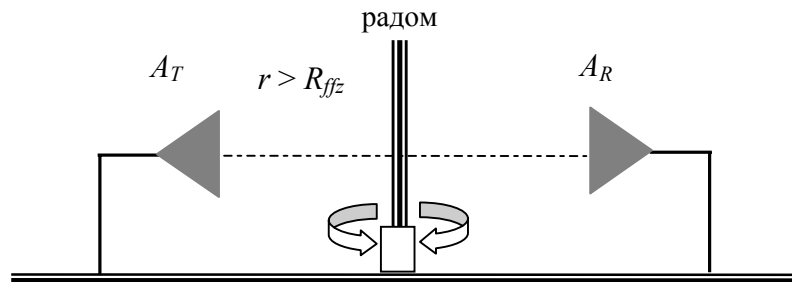
случая се измерва затихването за основния мод във вълновода без и с образец. Този метод е класически, но точността му не е достатъчно голяма.

Много добър и универсален метод за измерване на коефициенти на затихване и отражение на сигнала в образци от плоски радоми в измерителна постановка от типа на представената на *Фиг. Д1.5* (за теоретичен модел вж. напр. в [11]). Използват се две еднакви съгласувани антени (рупори или планарни излъчватели), едната – приемна, а другата – предавателна. Образецът с относително големи размери е поставен в далечната зона на антените $r > R_{ffz} = 2D^2/\lambda$, където D е напречният размер на апертурата на антената, а λ е дължината на вълната в свободното пространство. Размерът на образца се избира достатъчно голям, за да не влияе на измерванията (по-голям от диаметъра на първата Френелова зона на антената). При ниски честоти това означава, че образецът трябва да е доста голям. За да се намалят размерите, може да се използва диелектрична леща пред рупора за получаване на успореден сноп от антенната апертура на по-близки разстояния от далечната зона.

Този метод на измерване може да бъде реализиран по настоящия договор с цел оценка на параметрите на антените покрития, които ще се използват за антенните прототипи за 3.5 GHz. Проблем е големината на рупорните антени за измерителната постановка. Вместо тях могат да се използват два еднакви планарни излъчватели, които на по-късна фаза ще бъдат изработени по настоящия проект.



Фиг. Д1.4 Измерване на затихване в радома в правоъгълен вълновод



Фиг. Д1.5 Принципна схема за измерване на коефициенти на затихване и отражение на сигнала през радома за различни ъгли на падане: A_T – излъчваща антена; A_R – приемна антена