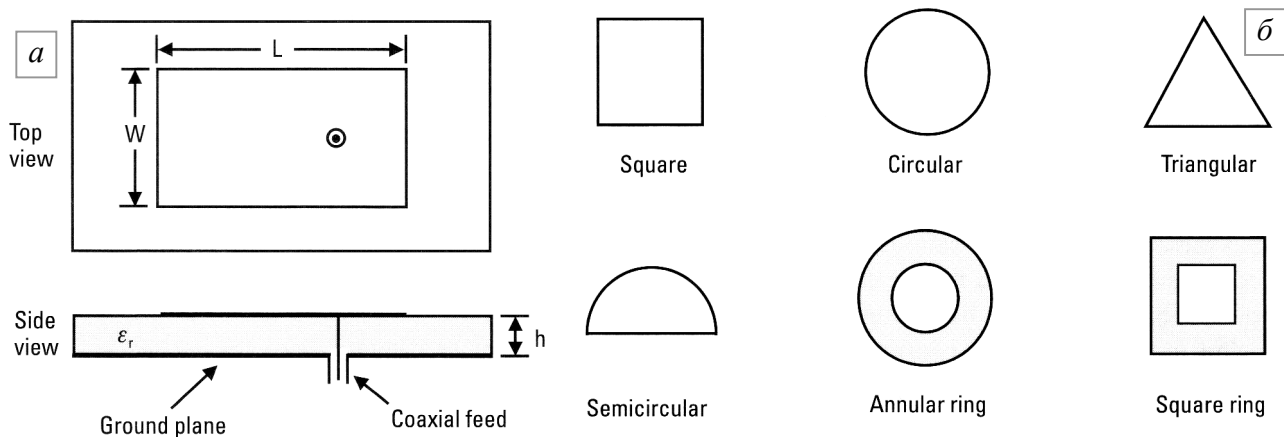


Магистърски курс "Анени за безжични комуникации"

1. Обзор на единичните микролентови излъчватели, подходящи за безжични мрежи (WLAN)

1.1 Регулярни микролентовите излъчватели.

Микролентов излъчвател. Класическият микролентов излъчвател е правоъгълен резонатор с размери $L \times W$, като обикновено $W = 0.75L$ – Фиг. Д.2.1. Има и голямо разнообразие на форми на излъчвателите, освен правоъгълния: квадратен, кръгъл, елиптичен, триъгълен, шестоъгълен и с по-сложна форма – полукръг, пръстен (кръгъл и квадратен) и пр. Всеки един от тях има приложения като антенен излъчвател [2-9]. В Табл. 1 са резюмирани основните изисквания към подложката, за да работи микролентовия излъчвател – дебела и с малка диелектрична проницаемост.



Фиг. Д.2.1 Микролентов излъчвател, захранван с коаксиален кабел (а); различни по форма микролентови излъчватели (microstrip patches)

	тънка подложка	дебела подложка
малка ϵ_r	за многослойни структури	микролентови антени
голяма ϵ_r	микролентови линии и интегрални схеми	дебели структури с повърхнинни вълни

	MIC	MSA
h	≤ 0.159 cm	≥ 0.159 cm
ϵ_r	≥ 9.8	≤ 9.8
W	Small	Large
Radiation	Minimized	Maximized

Табл. Д.2.1 Сравнение между приложимостта на тънки и дебели подложки (горе) и изисквания към подложката в зависимост от приложението: за микровълнови интегрални схеми (MIC) и за микролентови излъчватели (MSA)

Основни предимства и недостатъци. Микролентовият излъчвател е много популярен за антени, но има и някои недостатъци:

Предимства:

- Те са леки, с малко тегло и ниски (плоски);
- Те са в пълно съответствие с повърхността на подложката и я следват;
- Те са лесни за производство в големи количества по литографска технология
- Лесно се интегрират с микровълновите интегрални схеми и отделни компоненти;
- Те имат линейна или кръгова поляризация в зависимост от проектирането им;
- Те могат да бъдат много компактни и удобни за персонални комуникационни устройства;
- Те позволяват работа в две, три и дори в повече честотни обхвати.

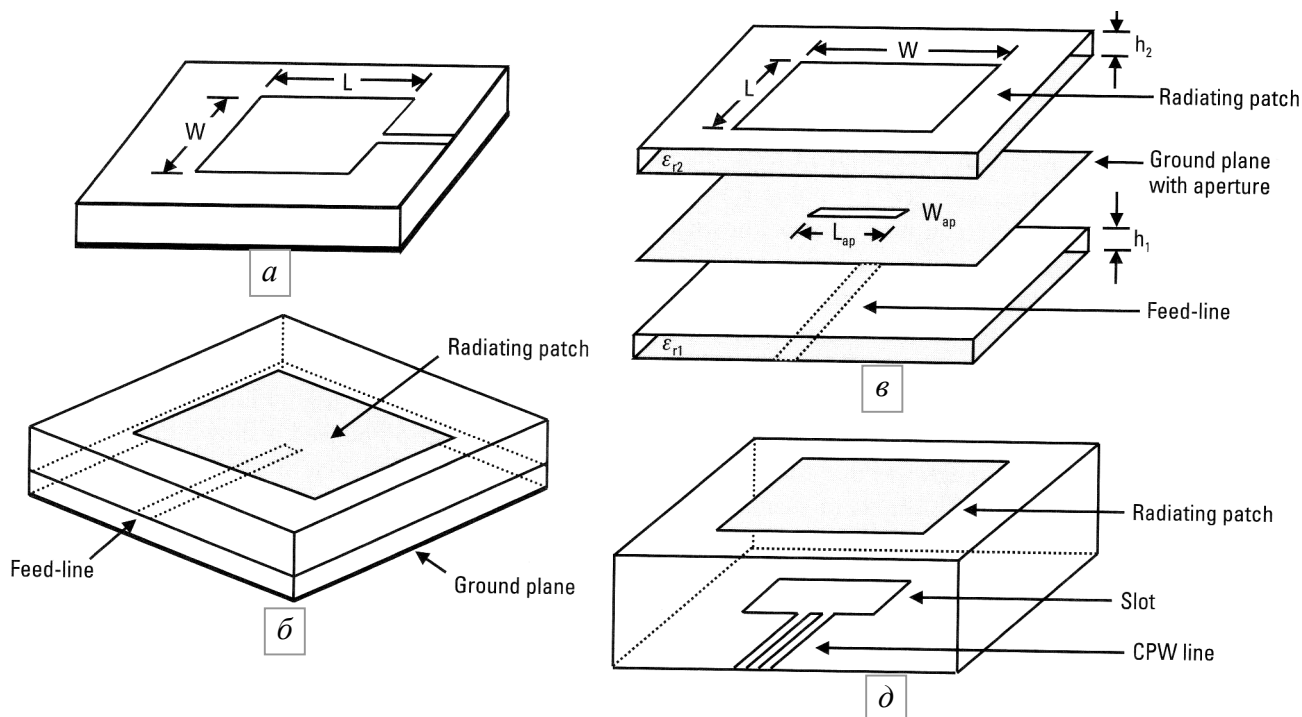
Недостатъци:

- Те имат нисък коефициент на усилване;

- Те обикновено имат тясна честотна лента (1-5 %), освен ако не се проектират по специален начин;
- Те имат ниска разсейвана мощност и не са подходящи за мощни устройства;

1.2 Захранване на излъчвателите (фидерни линии).

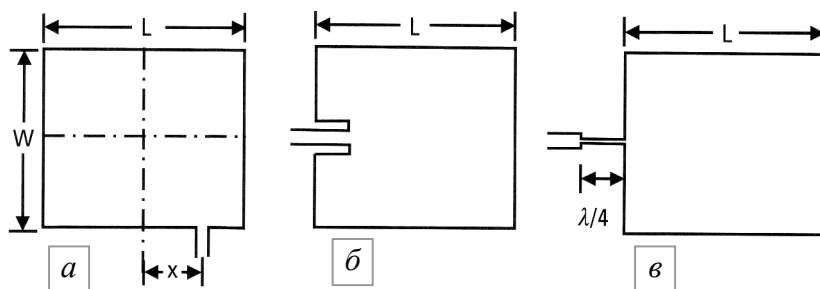
На Фиг. Д.2.1а и Фиг. Д.2.2 са показани най-разпространените техники за захранване на микрорентовите излъчватели: чрез коаксиален кабел в определена точка; директно свързване с микрорентова линия, чрез електромагнитна връзка с микрорентова или друга линия, чрез електромагнитна връзка през излъчваща апертура (процеп), чрез копланарен вълновод и процеп в една равнина и др. Всички те имат определени предимства и недостатъци в зависимост от целите и предназначението.



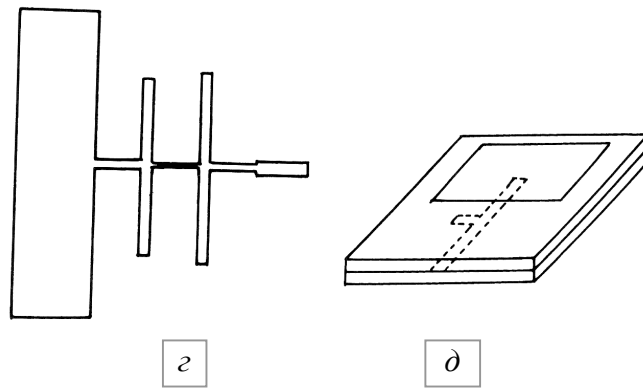
Фиг. Д.2.2 Типични техники за захранване на микрорентовия излъчвател: а) директно с микрорентова линия, б) електромагнитно чрез микрорентова линия; в) чрез излъчваща апертура (процеп); г) чрез копланарен вълновод и процеп в една равнина

1.3 Съгласуване на излъчвателите.

Микрорентовите излъчватели обикновено се нуждаят от допълнително съгласуване със захранващите линии, за да се подобри работата му и да се разшири честотната лента. На Фиг. Д.2.3 са показани различни техники на съгласуване: включване на микрорентовата линия в неизлъчваща стена, вкопаване навътре в излъчвателя, използване на четвъртвълнови трансформатори, чрез импедансни съгласуващи линии, чрез съгласуващи шлейфове и др.



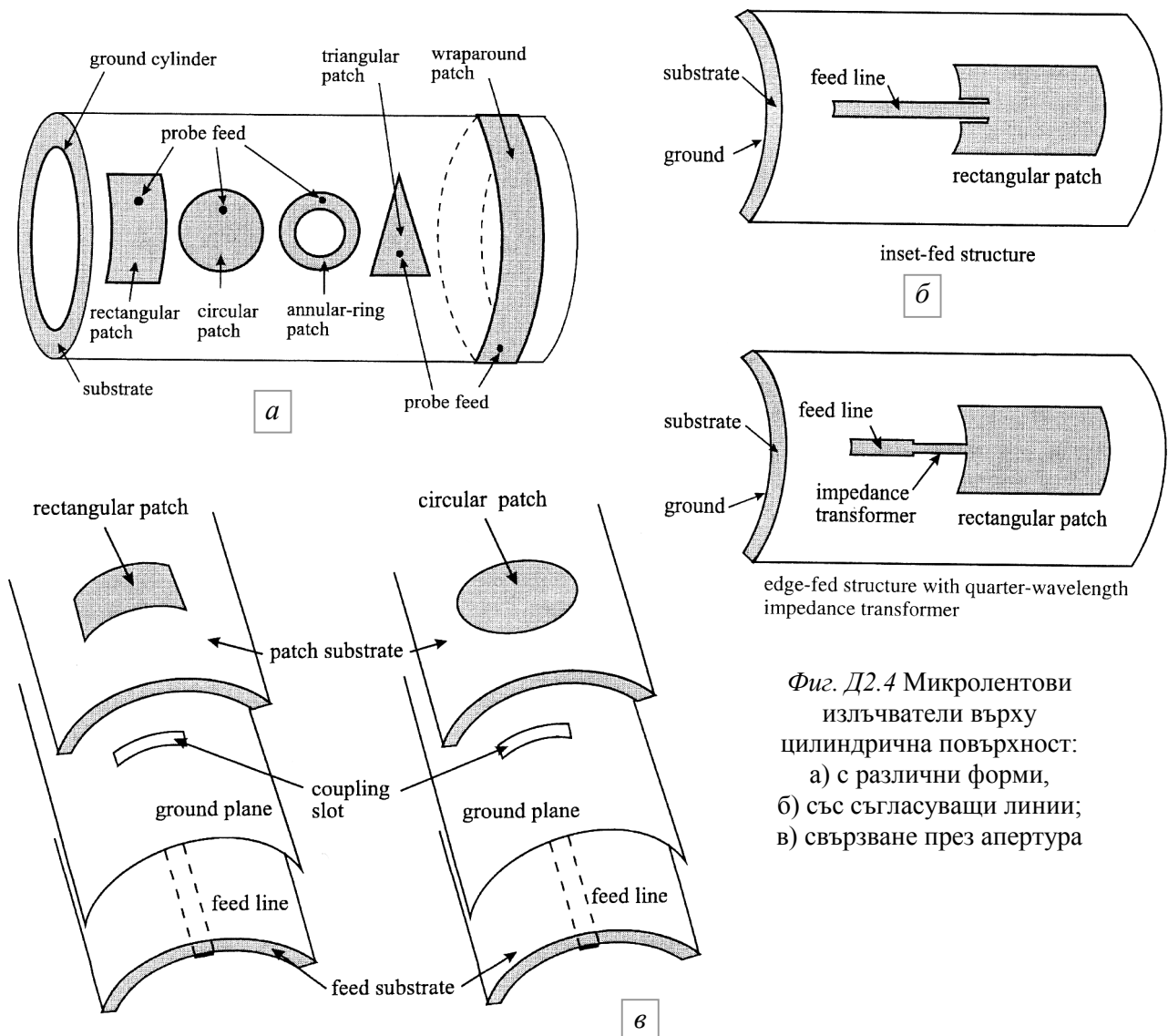
Фиг. Д.2.3 Техники на съгласуване на микрорентов излъчвател: а) включване на микрорентовата линия в неизлъчваща стена; б) вкопаване в излъчвателя, в) използване на четвъртвълнов трансформатор



Фиг. Д2.3 (продължение): г) Чрез импедансно-съгласуваща линия; д) чрез съгласуващи шлейфове

1.4 Излъчватели върху непланарни повърхности.

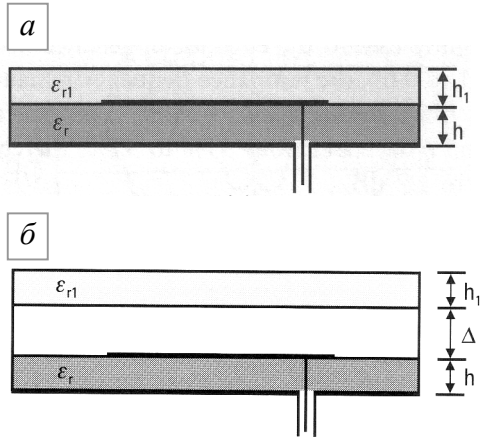
Микролентовите излъчватели могат да се разполагат освен върху обикновени планарни подложки, така и върху не-планарни – цилиндрични, конични, сферични или др. вид повърхности. На Фиг. Д.2.4 са показани примери за подобни излъчватели. По същество те не се различават съществено от планарните си прототипи, но имат някои предимства. Например, когато са реализирани като решетки, те имат много по-добър пространствен обзор при запазване на честотната лента и диаграмата на антената на по-големи ъгли.



Фиг. Д2.4 Микролентови излъчватели върху цилиндрична повърхност: а) с различни форми, б) със съгласуващи линии; в) свързване през апертюра

1.5 Покрити и окачени излъчватели.

Микролентовите излъчватели често се покриват с диелектричен защитен слой или се боядисват (вж. Фиг. Д2.5а), или се покриват с антенно покритие (радом) през слой въздух или диелектрична пяна (вж. Фиг. Д2.5б). Това влияе на работата на излъчвателя, като най-често води главно до намаляване на работната честота. В някои случаи, обаче, се търси ефект на разширяване на честотната лента BW чрез увеличаване на дебелината на покритието (вж. Табл. Д2.2). Диелектричната проникваемост на покритието също има значение – тя не трябва да е голяма.



($L = 3$ cm, $W = 4$ cm, $\epsilon_r = 2.55$, $h = 0.159$ cm, $x = 0.7$ cm, and $\epsilon_{r1} = 2.55$)

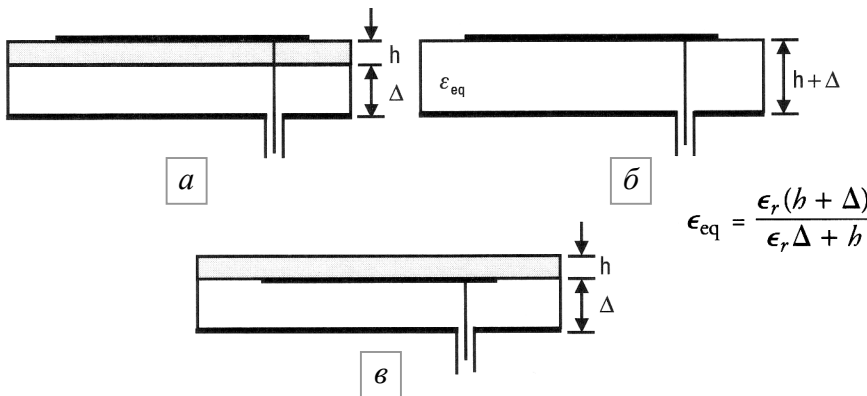
h_1 (cm)	R_{in} (Ω)	f_0 (GHz)	BW (MHz)
0	73	2.975	63
0.05	72	2.921	61
0.10	71	2.900	62
0.50	58	2.827	69
1.00	38	2.801	80

($L = 3$ cm, $W = 4$ cm, $\epsilon_r = 2.55$, $h = 0.159$ cm, $x = 0.7$ cm, and $h_1 = 0.1$ cm)

ϵ_{r1}	f_0 (GHz)	BW (MHz)
2.55	2.900	62
4.30	2.835	59
10.0	2.678	51

Фиг. Д2.5 Покрит микрентов излъчвател: а) директно; б) през въздушен слой

Табл. Д2.2. Влияние на дебелината или диелектричната проникваемост на покритието върху честотната лента

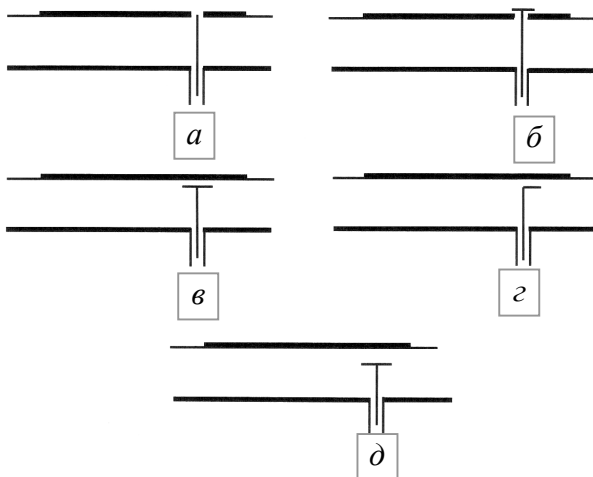


$$\epsilon_{eq} = \frac{\epsilon_r (h + \Delta)}{\epsilon_r \Delta + h}$$

Δ (cm)	ϵ_{eq} for $\epsilon_r =$	
	2.55	4.3
0.01	2.3358	3.5975
0.02	2.1736	3.1416
0.05	1.8602	2.4029
0.10	1.5953	1.8908
0.20	1.3684	1.5149
0.50	1.1719	1.2272
1.00	1.0910	1.1177

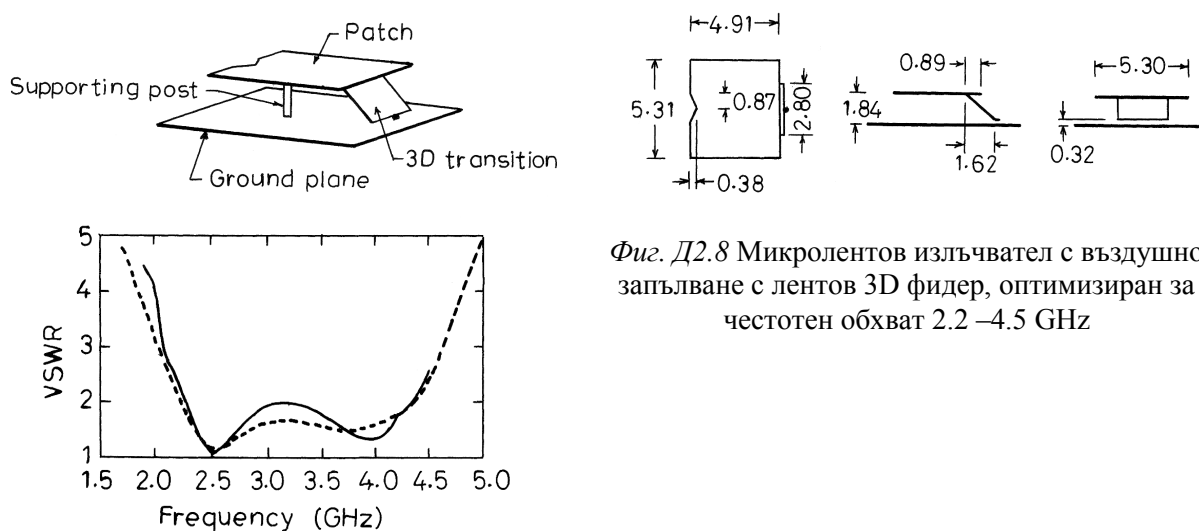
Фиг. Д2.6 Окачен микрентов излъчвател върху тънка подложка (а); еквивалентна проникваемост (б); обрнат окачен излъчвател

Табл. Д2.3. Еквивалентна диелектрична проникваемост в зависимост от дебелината въздушния слой



Фиг. Д2.7 Дебели микрентови излъчватели, захранвани с коаксиален кабел с корекция на индуктивността на вътрешната сонда

Много добро решение за подобряване на работата на микролентовия излъчвател е конструкцията с окачване – *Фиг. Д2.6*. В този случай микролентовият проводник се изработва на тънка подложка, която се “окачва” на пенообразен слой или във въздуха. Така еквивалентната диелектрична проницаемост силно намалява (*Табл. Д2.3*), с което параметрите на излъчвателя се подобряват. Допълнително подобрене може да се получи, ако се извърши корекция на захранващия кабел с цел да се компенсира индуктивността на възбуждащата сонда – *Фиг. Д2.7*. Може да се използва и специално 3D захранване, с което се намалява индуктивността на фидера, а честотната лента се подобрява съществено. На – *Фиг. Д2.8* е даден пример за подобно захранване на въздушен излъчвател (диелектрична проницаемост = 1), работещ в обхвата 3.5 GHz.



Фиг. Д2.8 Микролентов излъчвател с въздушно запълване с лентов 3D фидер, оптимизиран за честотен обхват 2.2 –4.5 GHz

1.6 Честотно и импедансно прескаляране на излъчватели.

Много често при проектирането на микролентовите излъчватели се случва измерените и проектираните параметри да се различават (основно това се отнася до централната честота). В друг случай се случва и следната ситуация – разполага се с размерите на излъчвател за определена честота, но се налага да се пре-проектира за друга. Тогава може с успех да се извършва прескаляране на излъчвателя. Процедурата е относително проста:

1) Измерва се резонансната честота за изработен излъчвател с дължина $L_{measured}$. Търсената нова дължина $L_{required}$ е

$$L_{required} = L_{measured} * f_{measured} / f_{required}$$

По същия начин може да се определи и ширината на излъчвателя.

2) Освен размерите се налага за де преизчисли и импедансът от измерения Z_{in} до търсения $Z_{required}$, за да се определи и новото място на захранването от x до x_{new} . Това става по следните формули:

$$Z_e = Z_{in} / \sin^2(\beta x)$$

$$\begin{aligned} Z_{required} &= Z_e \sin^2(\beta x_{new}) \\ &= Z_{in} \sin^2(\beta x_{new}) / \sin^2(\beta x) \end{aligned}$$

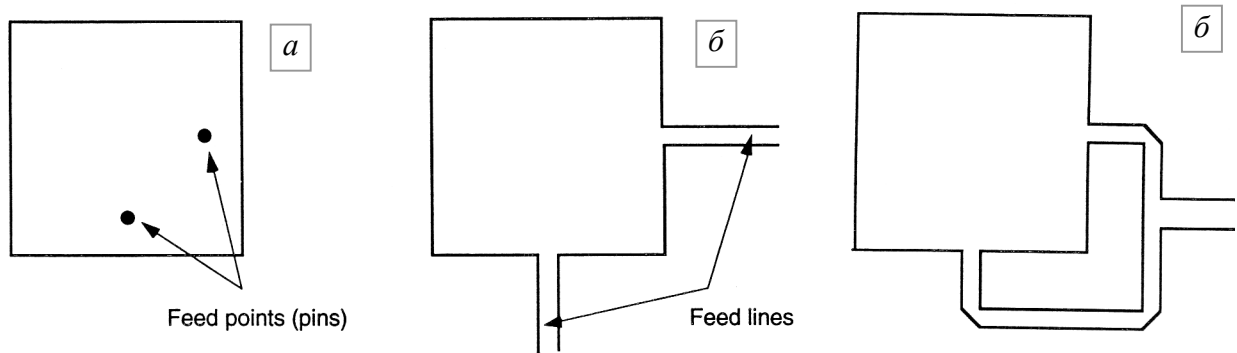
и следователно

$$x_{new} = (1/\beta) \cdot \sin^{-1} \sqrt{(Z_{required}/Z_{in}) \cdot \sin^2(\beta x)}$$

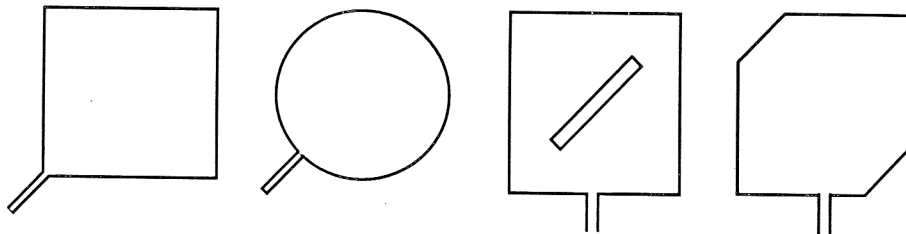
където $\beta = 2\pi/\lambda_g$.

1.7 Излъчватели с двойна поляризация.

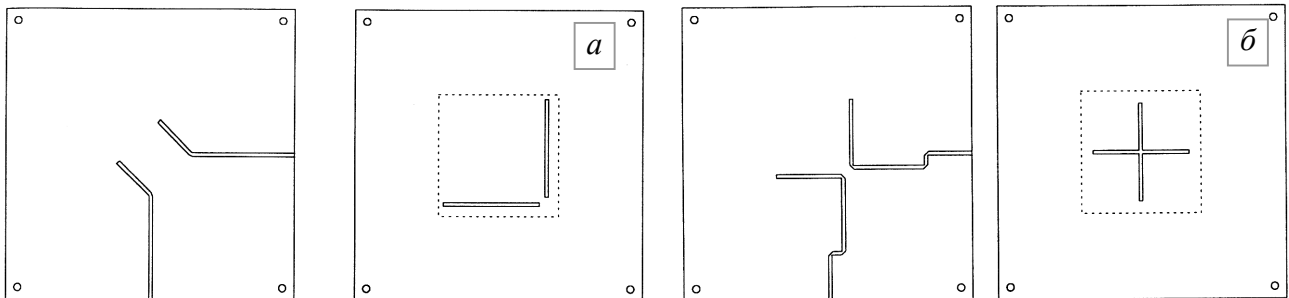
Освен с линейна поляризация, микролентовите излъчватели могат да се проектират и с кръгова поляризация.



Фиг. Д2.9 Симетрични микролентови излъчватели с двойна поляризация: а) захранване с два коаксиални кабела; б) захранване с две микролентови линии; в) захранване с Т-образно съединение



Фиг. Д2.10 Микролентови излъчватели с двойна поляризация с несиметрична форма, захранвани с една микролентова линия



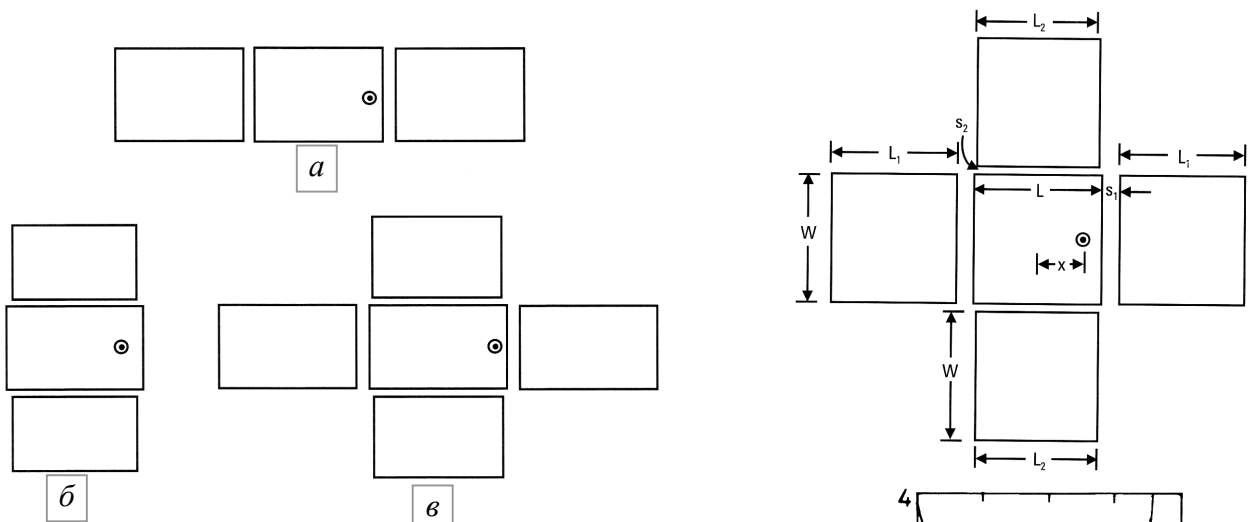
Фиг. Д2.11 Захранване на симетрични микролентови излъчватели с двойна поляризация чрез две апертури: а) отделни; б) във формата на кръст

2. Многорезонансни, многослойни и широколентови микролентови излъчватели

Класическите микролентови единични излъчватели обикновено са теснолентови. Съществуват различни механизми за разширяване на честотната им лента: използване на многорезонансни излъчватели, многослойни структури, stacked излъчватели (един върху друг) и пр. Тук са разгледани повечето от тях.

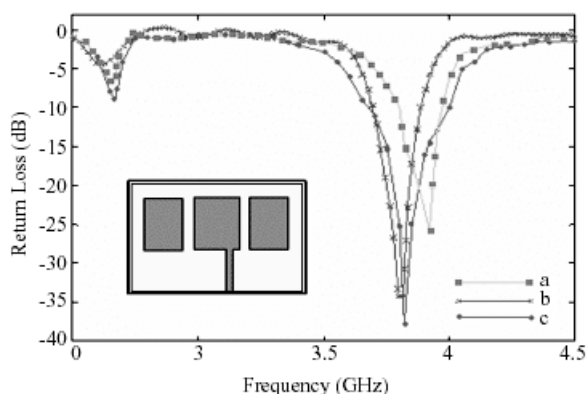
2.1 Многорезонансни излъчватели.

Един от известните методи за разширяване на честотната лента е използването на няколко излъчвателя (вместо един), захранвани едновременно. На *Фиг. Д.2.12* са показани системи с 3 и 4 резонатора в една плоскост, свързани ЕМ чрез излъчващите или неизлъчващите си стени, или комбинирано. Така честотната лента може да нарасне, сравнена с тази на един излъчвател. Пример с 4 резонатора за честотен обхват, близък до 3.5 GHz, е даден на *Фиг. Д.2.13*. В резултат на това, обаче, се увеличава размерът на структурата, което е основният недостатък на подобни системи. За да се избегне това, може да се използват вместо цели резонатори, само тънки лентички към основния резонатори или само тънки свързани лентички – *Фиг. Д.2.14*. Проектирането на подобна система е сложно и трудоемко. Друг недостатък на тези ЕМ свързани резонатори е критичният характер на връзката и дори нереализуемост на диаграмата при по-сложни конфигурации. В този случай може да се използват подобни структури, но не чрез ЕМ връзка, а свързани директно чрез къси отрязъци от микролентови линии.

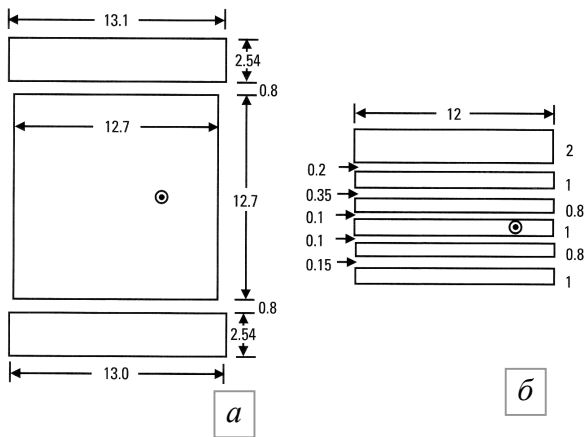


Фиг. Д.2.12 Микролентови излъчватели, свързани ЕМ и захранвани с коаксиален кабел: а) свързани чрез излъчващите стени; б) свързани чрез неизлъчващите стени; в) свързани комбинирано

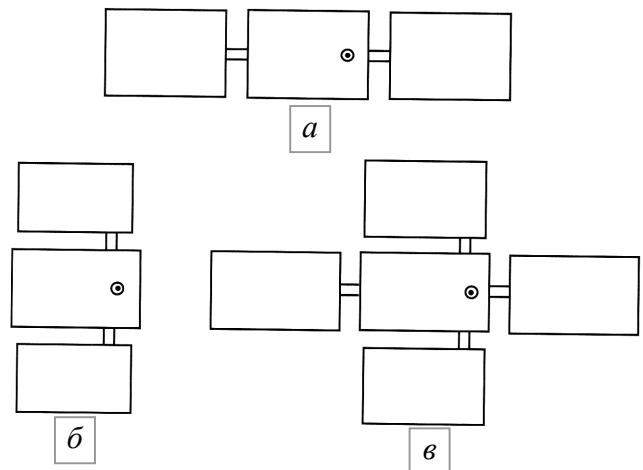
Фиг. Д.2.13 (вдясно) Конкретна 4-резонансна структура за обхват ~ 3 GHz



Фиг. Д.2.14 (вляво) Структура с 3 резонатора за 3.7 GHz (симулации и измерване)



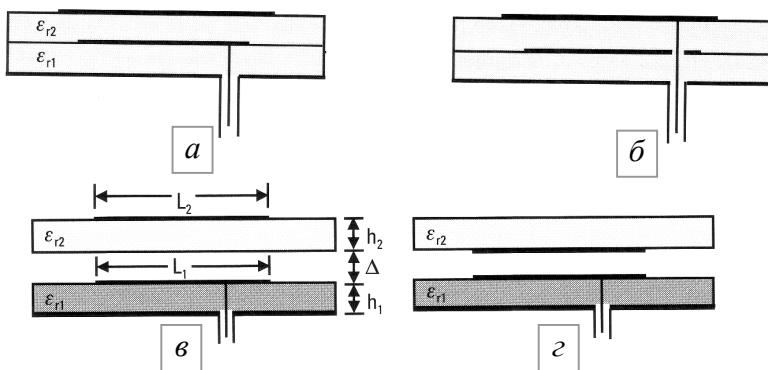
Фиг. Д2.15 Структура с един резонатор и две тънки ленти (а); структура само с тънки ЕМ свързани ленти (б)



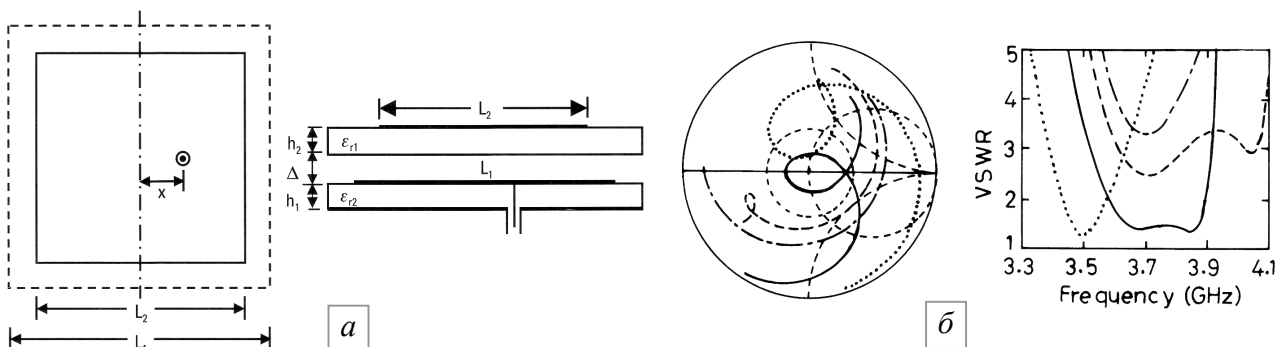
Фиг. Д2.16 Микролентови излъчватели, свързани директно с къса микролентова линия и захранвани с коаксиален кабел: а) свързани през излъчващите стени; б) свързани през неизлъчващите стени; в) свързани комбинирано

2.2 Многослойни (stacked) широколентови излъчватели.

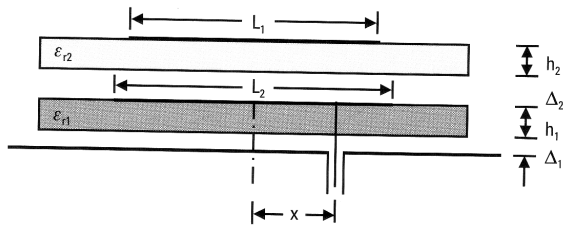
Използването на свързани ЕМ излъчватели в една равнина има два гавни недостатъка – размерите на антената стават големи а характеристиките се изменят силно с честотата. Затова по-ефективно решение е използването на ЕМ свързани резонатори, но разположени един върху друг (stacked patches). На Фиг. Д.2.17а,б са показани различни системи от stacked излъчватели – разположени един върху друг на различни подложки, като се захранва или горния или долния. Такива излъчватели имат широка лента – на ниво на SWR < 2 тя може да стигне до 10-30 %, а импедансът се изменя слабо в почти цялата честотна лента. Още по-широка лента може да се постигне при използване на stacked излъчватели с допълнителен въздушен слой – на Фиг. Д.2.17в,г. Пример за такава антена в честотен обхват 3.3-4.1 GHz е даден на Фиг. Д.2.18.



Фиг. Д2.17 Двойка микролентови излъчватели, разположени един върху друг (stacked patches), свързани ЕМ и захранвани с коаксиален кабел: а, б) подложки без въздушна междина между тях; в, г) подложки с въздушна междина между тях



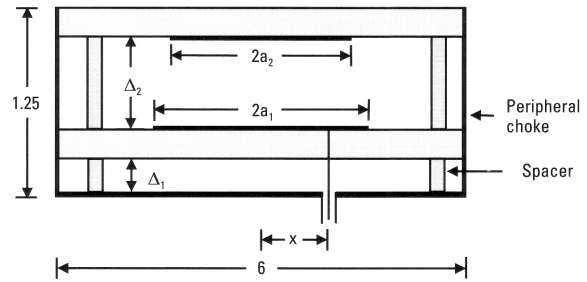
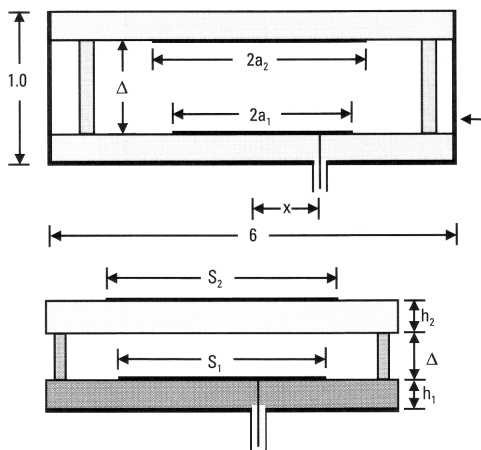
Фиг. Д2.18 Микролентов излъчвател (stacked), захранван с коаксиален кабел (а); Характеристики в честотен обхват 3.3 – 4.1 GHz



Фиг. Д2.19 Пример за микролентов излъчвател (stacked), захранван с коаксиален кабел

Табл. Д2.4 Характеристики на излъчвателя (честотна лента и усиление) в честотен обхват 3.75 – 3.95 GHz

Δ (cm)	x (cm)	f_0 (GHz)	BW (MHz)	Gain (dB)
0.5	1.10	3.885	684	8.0
1.0	0.60	3.930	167	7.8
1.5	0.40	3.878	85	6.3
2.0	0.35	3.844	58	5.3
2.5	0.30	3.821	45	5.5
3.0	0.30	3.802	39	7.2
3.5	0.30	3.785	41	9.2
4.0	0.35	3.772	54	10.6
4.5	0.40	3.765	85	10.6
5.0	0.50	3.787	134	9.3
5.5	0.50	3.804	132	7.4
6.0	0.50	3.810	108	5.9

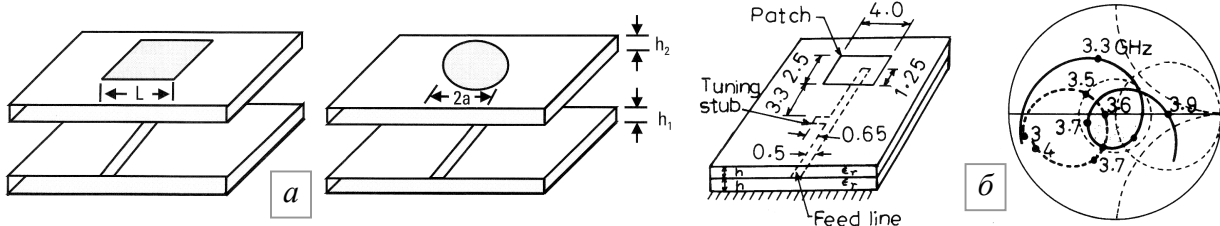


Фиг. Д2.20 Примери за кръгли и квадратни микролентови излъчватели (stacked)

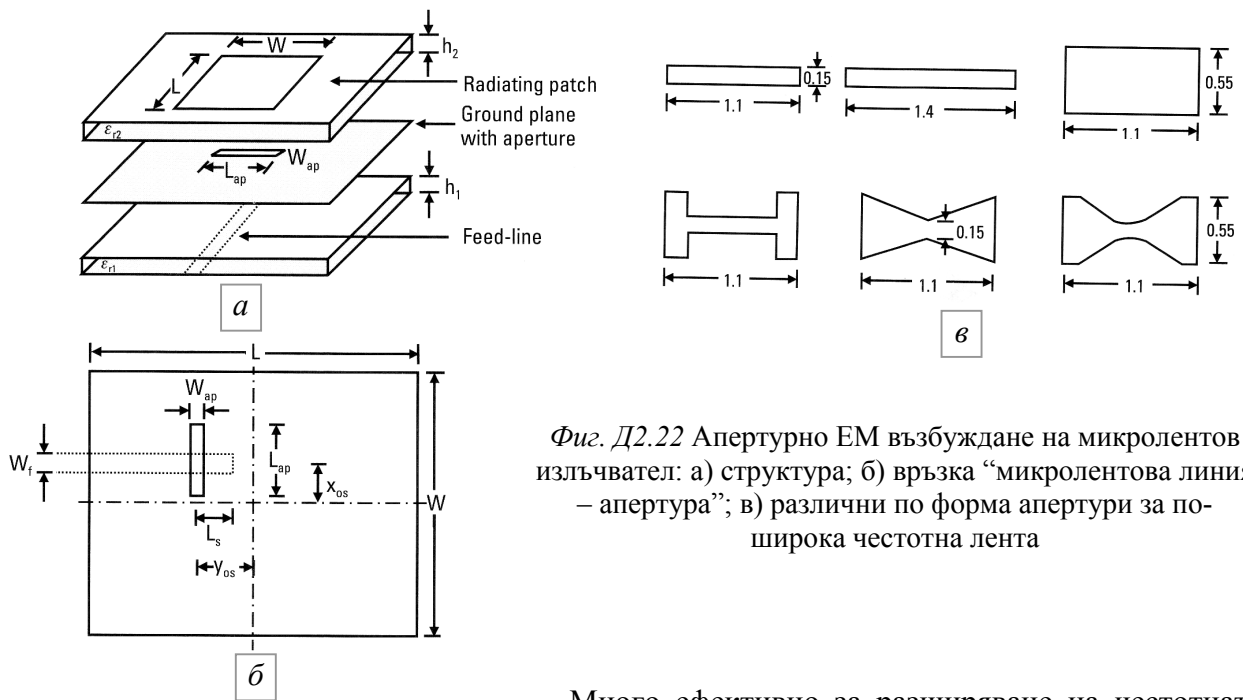
Още един пример за stacked антена в честотен обхват $\sim 3.7-3.9$ GHz е даден на Фиг. Д.2.19, а в Табл. Д2.4 са показани зависимостите на честотната му лента и усиляването при изменение на дебелината на въздушния слой и мястото за захранване с коаксиален кабел. Причините за по-добрите характеристики, сравнени с тези за един излъчвател, са няколко – ефективното нарастване на височината на резултантната антена, намаляване на ефективната диелектрична проницаемост и многорезонаторния ефект. Концепцията за ЕМ свързани (stacked) един върху друг излъчватели е приложима и за други форми на резонаторите – кръгли, квадратни, триъгълни и пр. – на Фиг. Д.2.20. В случая на кръгли резонатори цялата система може допълнително да се помести в екранирана цилиндрична кутия (cavity).

2.3 Многослойни излъчватели с микролентово или апертурно възбуждане

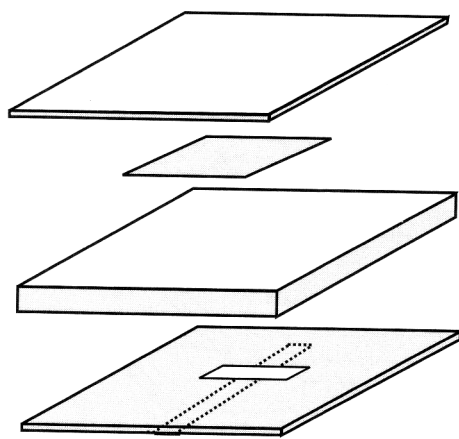
Друг начин за разширяване на честотната лента е ЕМ възбуждане на излъчвателя директно от микролентова линия – Фиг. Д.2.21а,б. Тази система има някои важни предимства. Първо, захранващата линия се прави върху тънка подложка, а между нея и излъчвателя може да има дебел въздушен или пенообразен слой и така се увеличава честотната лента. Второ, системата не е особено чувствителна относно мястото на разположение на микролентовата линия, както е в случая на възбуждане с коаксиален кабел.



Фиг. Д2.21 Микролентови излъчватели, възбуждани ЕМ директно с микролентова линия (а); допълнително съгласуване на линията за разширяване на лентата (обхват 3.4 – 3.7 GHz)(б)



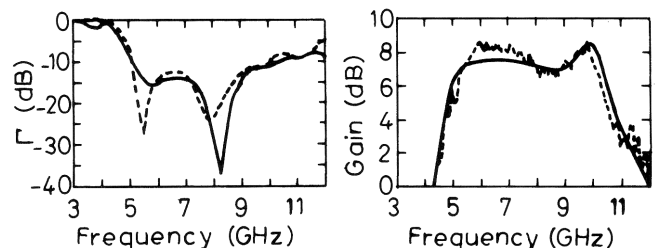
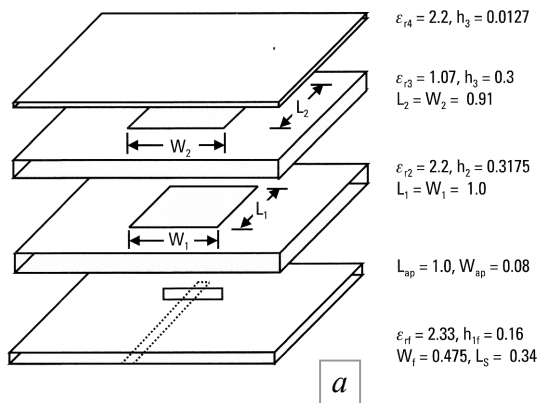
Фиг. Д2.22 Апертурно ЕМ възбуждане на микролентов излъчвател: а) структура; б) връзка "микролентова линия – апертура"; в) различни по форма апертури за по-широка честотна лента



Фиг. Д2.23 Антени тип SSFIP (strip-slot-foam-inverted patch)

Много ефективно за разширяване на честотната лента е апертурното ЕМ възбуждане на микролентови излъчватели от микролентова линия през излъчващ процеп – Фиг. Д.2.17а,б. Ако системата е добре проектирана, честотната лента може да бъде много широка – на ниво на $SWR < 2$ тя може да стигне до $\sim 70\%$. Най-ефективна е системата от тип SSFIP (вж. Фиг. Д.2.23). Това е така, защото допълнително се използва въздушен или пенообразен слой, който отделя апертурата и излъчвателя.

Същите тези апертурно възбуждани излъчватели могат да се подредят един над друг – stacked. процеп – Фиг. Д.2.24. Такава система има изключително широка лента Фиг. Д.2.24б. Недостатък е нейната сложност и голяма височина.

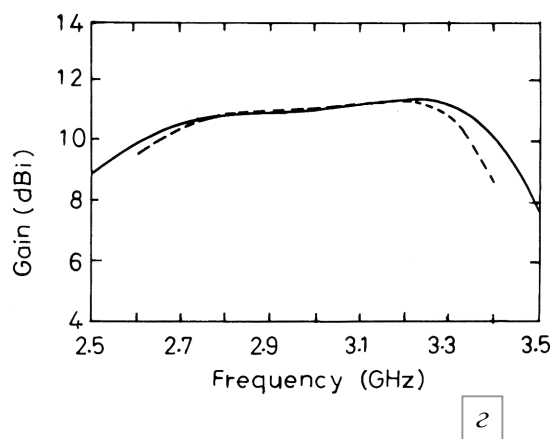
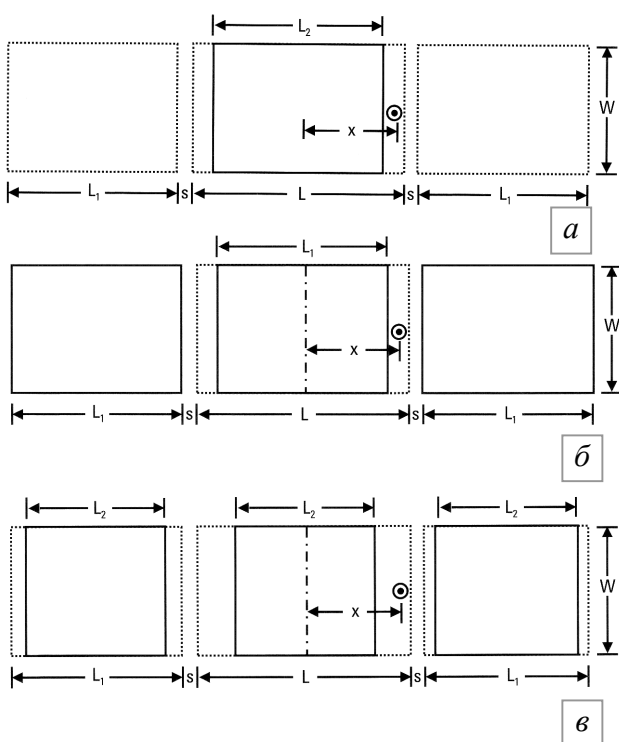


Фиг. Д2.24 Апертурно възбуждан stacked микролентов излъчвател (а); честотни характеристики в широк честотен обхват (б)

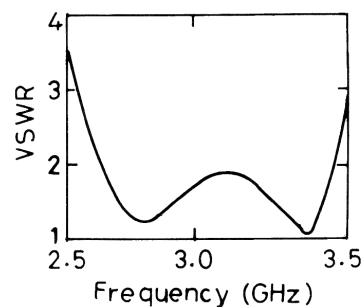
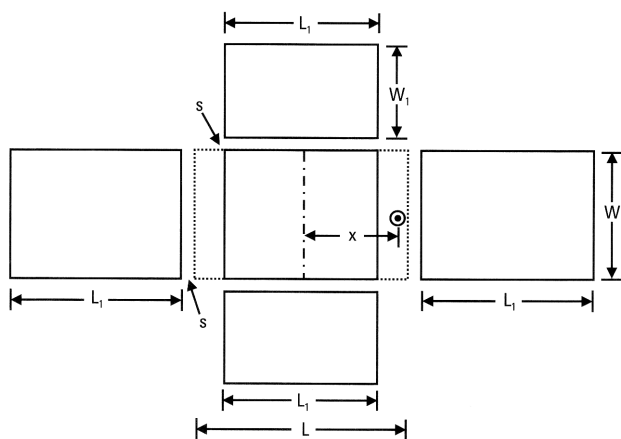
2.4 Многослойни многорезонансни (stacked) излъчватели.

Тези сложни антенни структури обединяват предимствата на два типа по-прости структури: много-резонаторните и многослойните (един върху друг – stacked) излъчватели. Това е техника за силно увеличаване на честотната лента и на усилването на антената, където това е необходимо. Тук вече има елементи на антенни решетки, т.е. много свързани отделни излъчватели, сфазирани по определен начин.

На *Фиг. Д.2.25* са показани различни системи от много резонатори в една равнина и други излъчватели под или над тях (stacked). Всичките се захранват коаксиално. Те имат подобни характеристики като антени, но конфигурацията на *Фиг. Д.2.26* има най-широка честотна лента, реализирана в обхвата ~ 3 GHz, около 30%. В *Табл. Д2.5* са сравнени различни конфигурации на излъчватели, работещи в посочения обхват. Вижда се ефекта от прилагането на разглежданата техника – честотната лента на 5 излъчвателя в една равнина, (захранва се вътрешният) е ~ 18 %; същата конфигурация, но с допълнителен stacked излъчвател отдолу (захранва се долният) има лента вече ~ 30 % усилването и работната честота се запазват. Основният проблем на тези структури е голямата площ, която заемат.



Фиг. Д2.25 Група от микролентови излъчватели, свързани ЕМ и захранвани с един коаксиален кабел: а) три излъчвателя отдолу и един отгоре; б) три излъчвателя отгоре и един отдолу; в) три излъчвателя отдолу и три отгоре; г) коефициент на усилване на групата от (б) в обхвата ~ 3 GHz



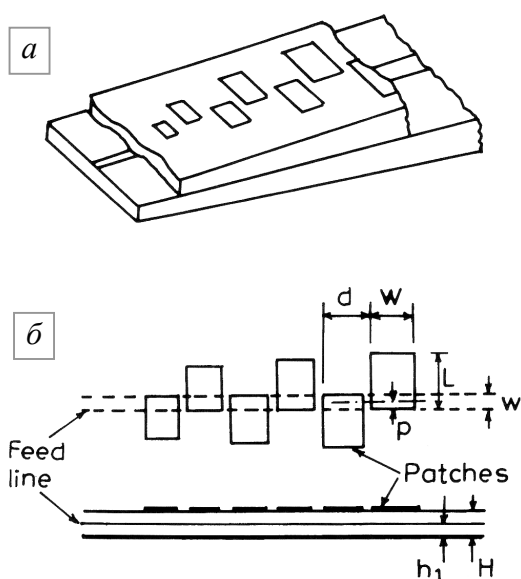
Фиг. Д2.26 Група от 6 микролентови излъчватели, свързани ЕМ и захранвани с един коаксиален кабел: 5отгоре и един отдолу и коефициент на стояща вълна в обхвата ~ 3 GHz

Configurations	BW (MHz)	Approx. f_0 (GHz)	Gain (dB)
Single-patch	129	2.66	9.1
Three gap-coupled	463	3.00	11.3
Five gap-coupled	574	3.05	12.1
One bottom/one top	405	2.85	9.1
Three bottom/one top	704	3.00	11.1
One bottom/three top	782	3.00	10.9
Three bottom/three top	734	3.00	11.3
One bottom/five top	920	3.00	11.7

Табл. Д2.5 Сравнение между различни конфигурации с микролентови излъчватели, свързани ЕМ и захранвани с коаксиален кабел за честотен обхват ~ 3 GHz

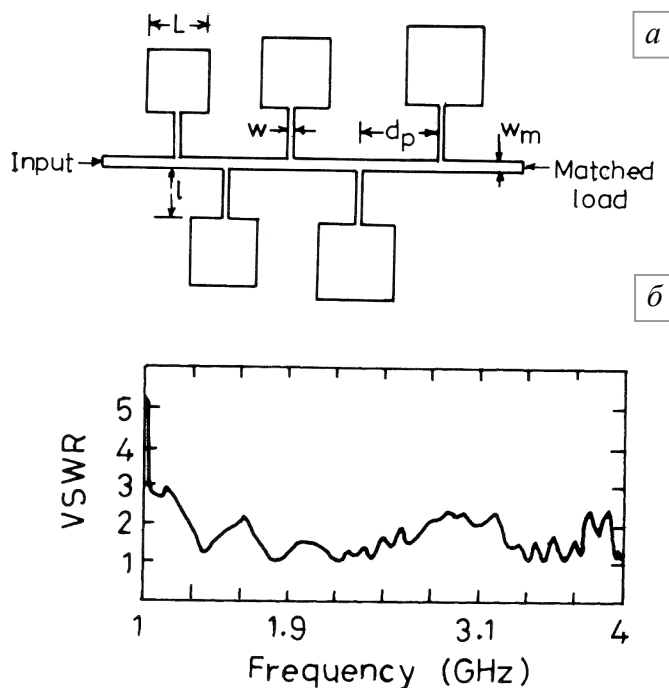
2.5 Log-периодични решетки от излъчватели.

При микролентовите излъчватели също може да се приложи принципа на log-периодичните антени за получаване на октавни честотни ленти. На Фиг. Д.2.27 е показан пример за подобна антена с ЕМ свързани излъчватели, като захранването е с помощта на плавно-разширяваща се микролентова линия. Всички геометрични размери, посочени на фигурата, се увеличават по принципа на log мащабиране с коефициент $1/\tau = L_{m+1}/L_m = W_{m+1}/W_m$. При този пример трябва да се променя и дебелината на подложката, което е технически проблем. На Фиг. Д.2.28 е показан друг пример за log-периодична антена с директно свързани излъчватели, захранвани последователно от съгласувана микролентова линия. На същата фигура е дадена честотната лента по SWR в обхвата 1.5 – 4 GHz и размерите на всеки от петте елемента.



Фиг. Д2.26 Микролентова log-периодична антена с ЕМ захранване от друга микролентова линия: а) вид на структурата; б) поглед отгоре и отстрани

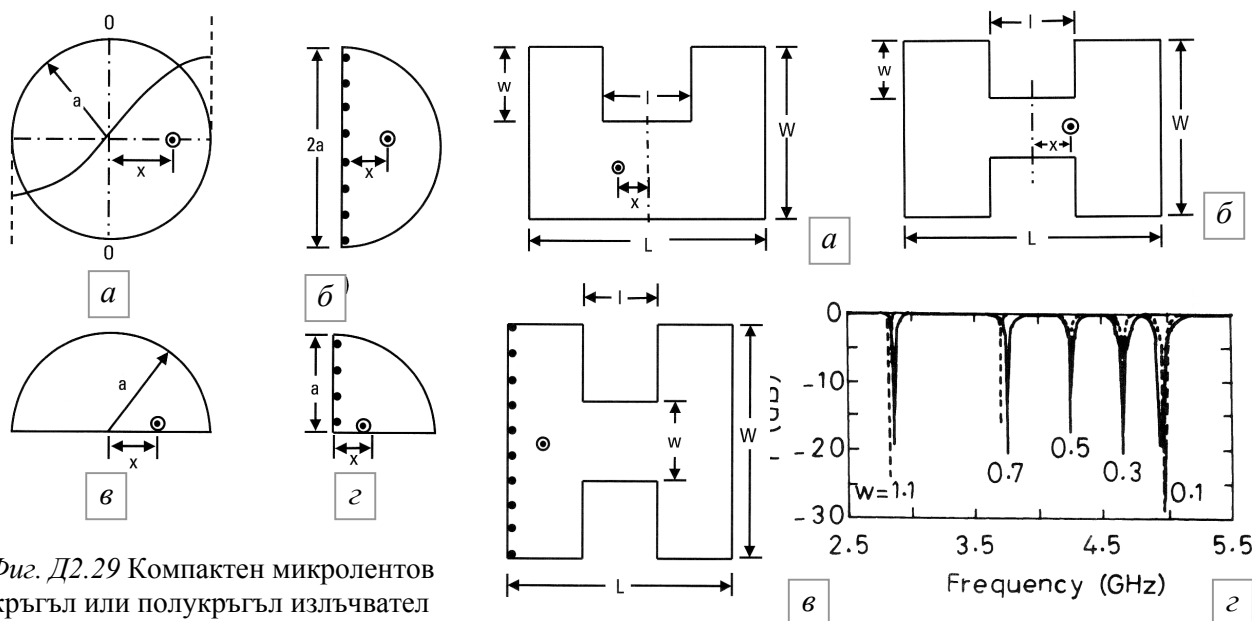
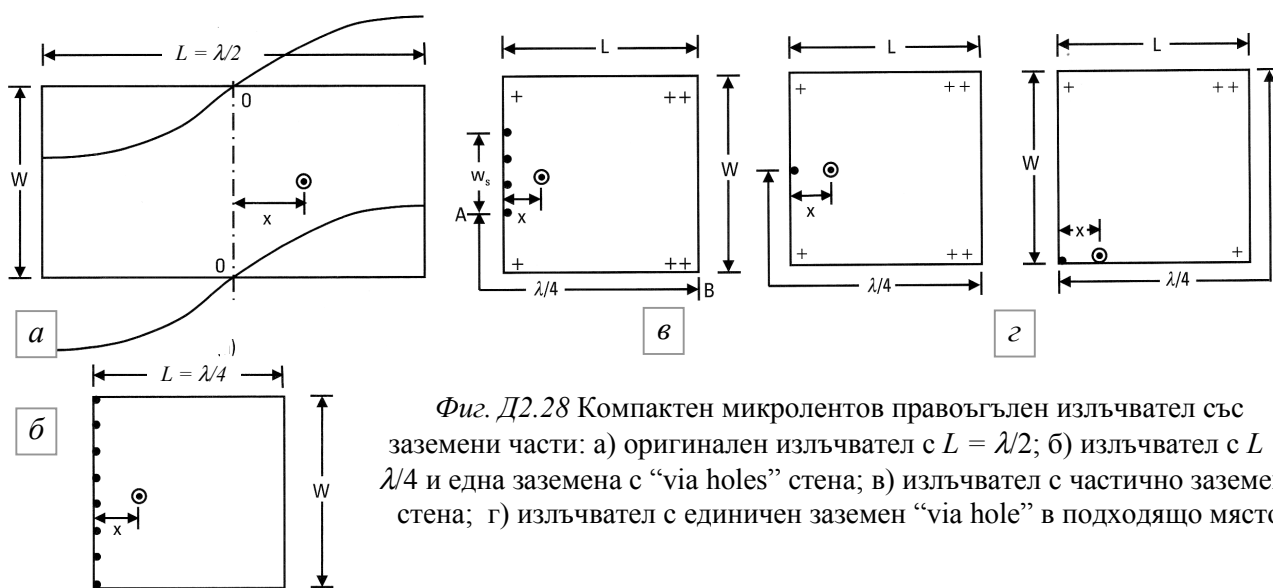
Фиг. Д2.27 (вдясно) Микролентова log-периодична антена с директно захранване от съгласувана микролентова линия: а) вид на структурата; б) честотна характеристика на SWR в обхвата 1.5-4 GHz; в) таблица с размерите на петте елемента



Number	f_0 (GHz)	L (cm)	l (cm)	w (cm)	d_p (cm)
1	2.68	3.94	2.20	0.32	4.39
2	2.82	3.72	2.09	0.32	4.18
3	2.97	3.54	1.98	0.40	3.97
4	3.13	3.36	1.88	0.43	3.76
5	3.29	3.19	1.79	0.44	3.58

2.7 Компактни микрелентови излъчватели.

Разширяването на честотната лента на микрелентовите излъчватели обикновено води до повече или по-малко увеличаване на размерите му. Обратно, понякога се налага размерите да се намаляват при запазване на характеристиките му, най-често при ниски честоти. Двойно намаление на размерите може да се постигне чрез закъсяване на едната страна на правоъгълен резонатор, работещ на основния ТМ₁₀ мод – Фиг. Д.2.28. Заземяването може да стане технологично чрез метализирани отвори (via holes) към заземения гръб на излъчвателя. Освен по цялата стена, заземяването може да е частично (само в областта около центъра) или дори само в една точка. Могат да се изработват и компактни излъчватели с друга форма: кръгли или полукръгли (Фиг. Д.2.29), както и П- или Н-образни – Фиг. Д.2.30. Освен показаните случаи, към компактните излъчватели могат да се прилагат същите техники, както към единичните излъчватели: ЕМ свързване на няколко секции, разполагане един върху друг (stacked) и др. подобни.



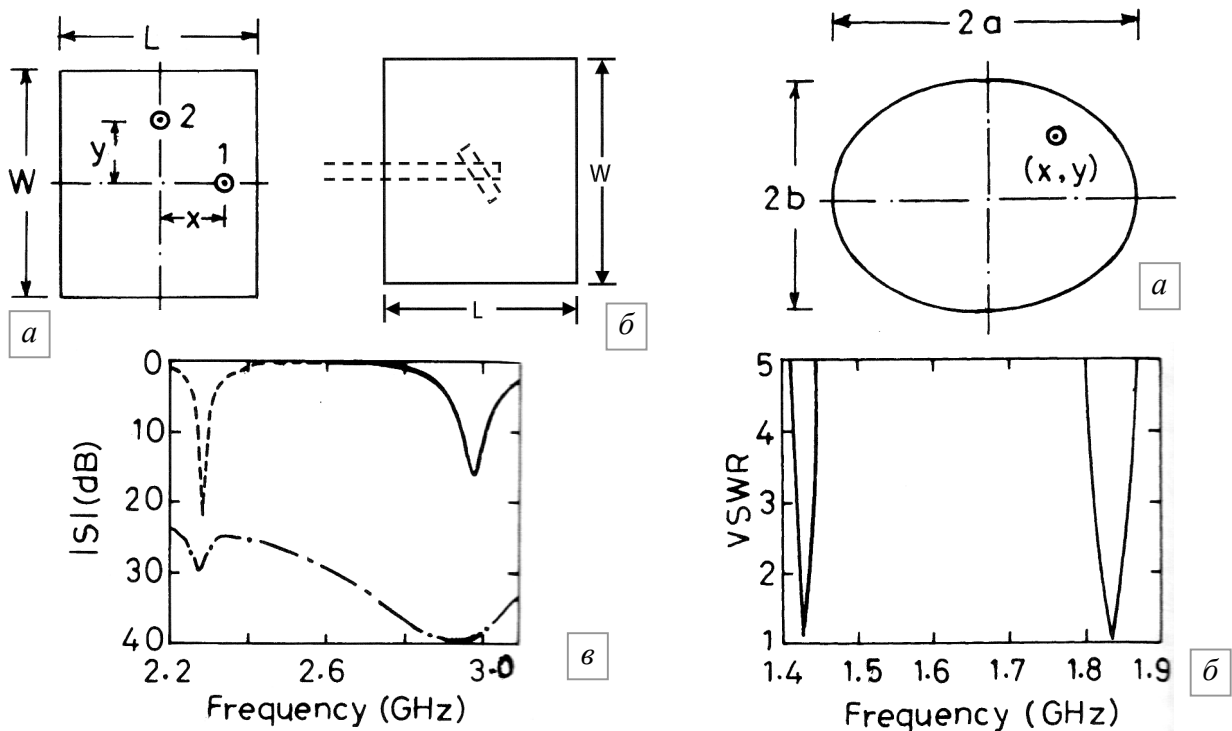
Фиг. Д.2.30 Микрелентови П- и Н-образни излъчватели (а, б); компактен Н-образен излъчвател (в) и неговите обратни загуби (г)

2.8 Дву- и многочестотни излъчватели.

Съществуват много съвременни приложения, където е необходимо използването на дву- или много-честотни излъчватели, основно в безжичните комуникации. По принцип микрорезонаторите излъчватели са много-честотни устройства, което ги прави естествени много-резонансни структури за тези приложения, но характеристиките им са различни. Има два основни начина за реализация на работа на излъчвателя в повече от една честотна лента – възбуждане на два ортогонални мода или работа на подходящи висши модове.

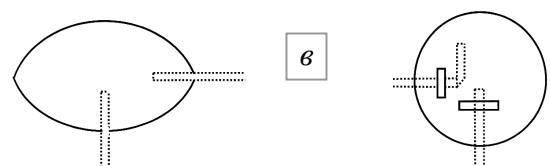
Обикновеният правоъгълен резонатор може да се възбуди на двете честоти на основните модове TM_{10} и TM_{01} , ако се възбуди в две внимателно подбрани точки – Фиг. Д.2.31а, в. Същото може да се получи и с апертурно възбуждане под наклон – Фиг. Д.2.31б. По подобен начин могат да се възбуждат и друг тип излъчватели – кръгли, елиптични и пр. (Фиг. Д.2.32). Така се осъществява дву-честотно действие на даден единичен излъчвател с доста близки характеристики на диаграмата на тези честоти.

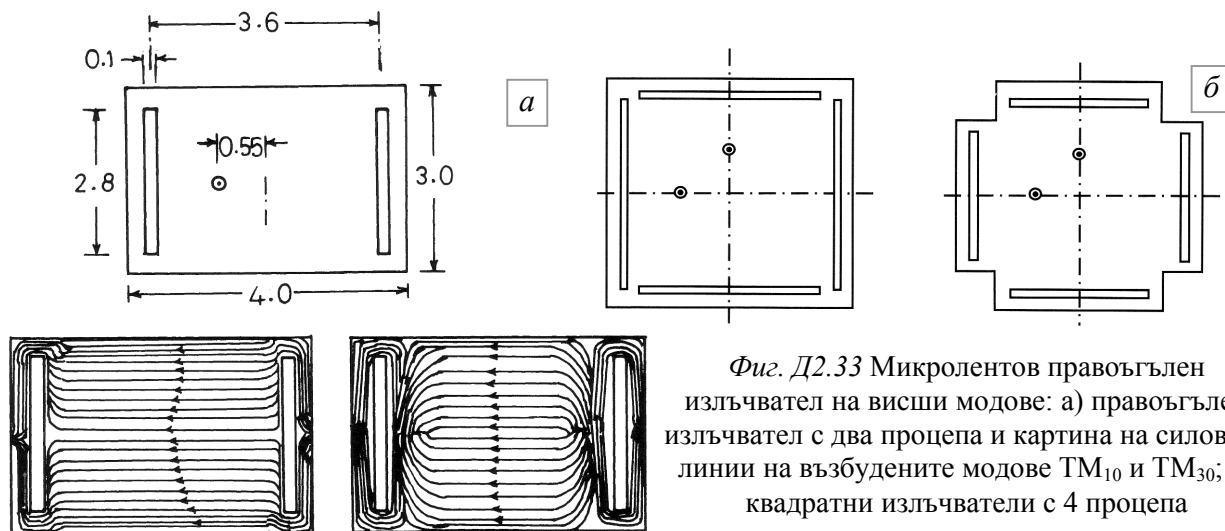
Друг начин за много-честотно действие на антените е създаване на условия за възбуждане на висши модове. Обикновеният правоъгълен резонатор може да се възбуди на двете честоти на основните модове TM_{10} и TM_{01} , ако се възбуди в две внимателно подбрани точки – Фиг. Д.2.31а, в. Същото може да се получи и с апертурно възбуждане под наклон – Фиг. Д.2.31б. По подобен начин могат да се възбуждат и друг тип излъчватели – кръгли, елиптични и пр. (Фиг. Д.2.32). Така се осъществява дву-честотно действие на даден единичен излъчвател с доста близки характеристики на диаграмата на тези честоти, които могат да се настройват в зависимост от широчината и дължината на елемента.



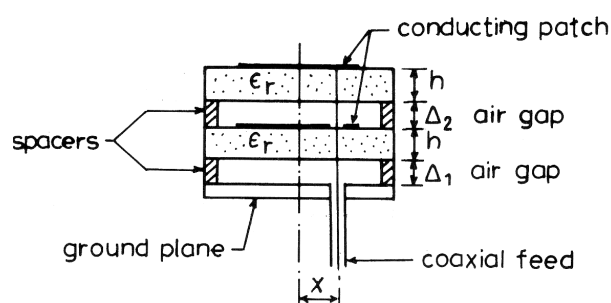
Фиг. Д.2.31 Микрорезонатор правоъгълен дву-честотен излъчвател: а) места на захранването с коаксиален кабел; б) ЕМ захранване през наклонена апертура; в) S-параметри на излъчвателя – S_{11} и S_{21} (изолация)

Фиг. Д.2.32 (вдясно) Микрорезонатор елиптически дву-честотен излъчвател: а) захранването с коаксиален кабел на едно място; б) SWR на излъчвателя; в) ЕМ захранване – директно от две ортогонални микрорезонаторни линии или чрез две ортогонални апертури





Фиг. Д2.33 Микролентов правоъгълен излъчвател на висши модове: а) правоъгълен излъчвател с два процепа и картина на силовите линии на възбудените модове TM_{10} и TM_{30} ; б) квадратни излъчватели с 4 процепа



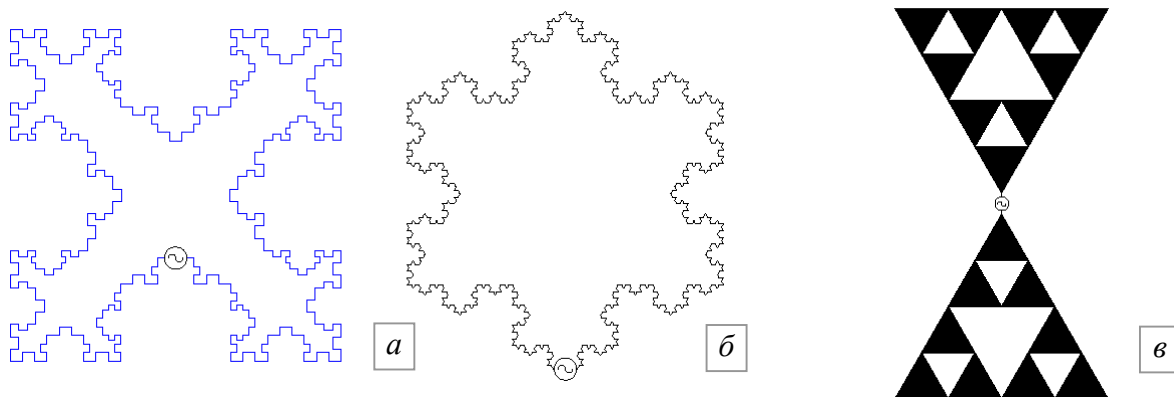
Фиг. Д2.34 Микролентов кръгъл stacked излъчвател, захранван с коаксиален кабел и с въздушни междини между слоевете

Друг начин за много-честотно действие на един излъчвател е създаването на условия да работи на няколко висши модове – Фиг. Д.2.33. Това е основен подход, но характеристиките на излъчвателя на тези висши модове обикновено се различават съществено.

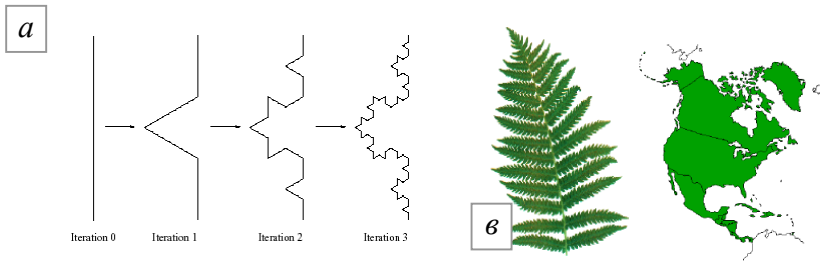
Накрая, както при едно-честотните излъчватели, дву-честотните също могат да се поставят един върху друг (stacked) (Фиг. Д.2.34) и така да се получават по-широки ленти и в двата честотни обхвата на действие.

2.9 Фрактални многочестотни антени.

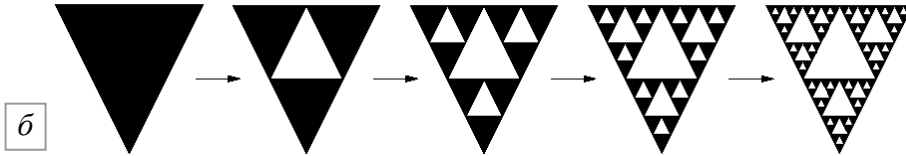
Относително слабо познати, но с много добри характеристики като едно- или много-обхватни антени са т. нар. фрактални антени – вж. примерите за диполни фрактални антени Фиг. Д.2.35. На Фиг. Д.2.36 са демонстрирани методите за генерация на формата на такъв тип антени ("фрактал" е важно математическо понятие, което тук не се разглежда).



Фиг. Д2.35 Фрактални антени – примери: а) диполна фрактална антена на Koch; б) диполна фрактална антена на Minkovski; в) много-обхватна диполна фрактална антена на Sierpinski

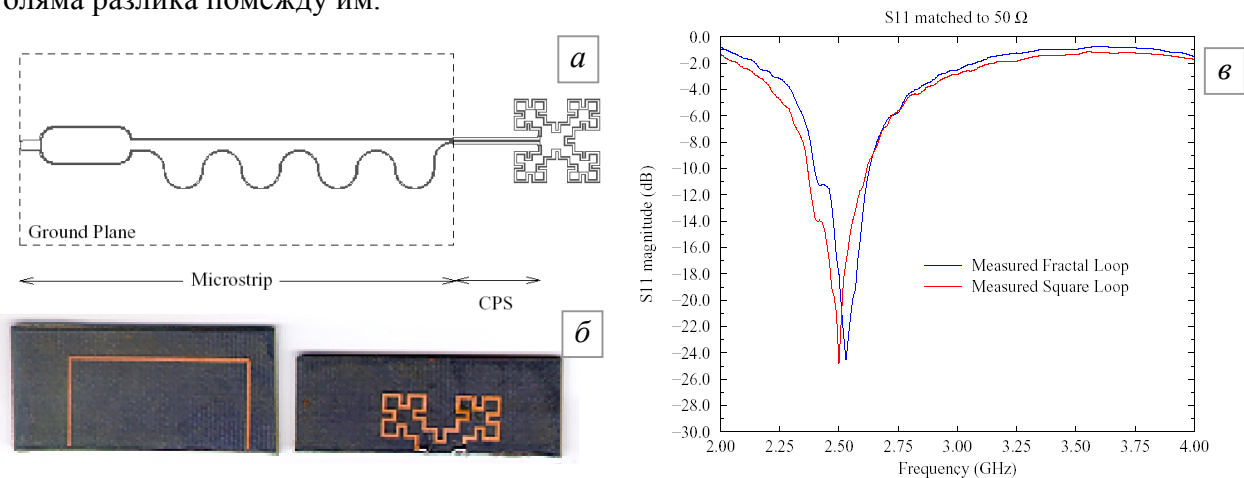


Фиг. Д2.36 Генерация на формата на фрактални антени: а) при диполна фрактална антена на Koch; б) при много-обхватна фрактална антена на Sierpinski; в) примери за фрактални елементи в природата

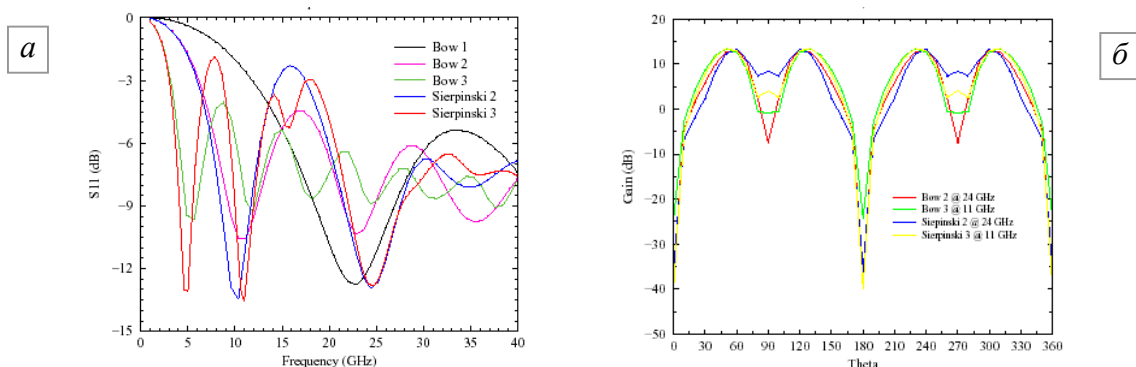


Някои от фракталните антени имат свойството силно да намаляват площта на дадена диполна при увеличаване на дължината ѝ. Това е много ценно свойство при създаване на компактни антени за много ниски честоти – вж. примера на Фиг. Д.2.37 за фрактална диполна Koch антена за 2.5 GHz. Ако се сравнят кръгла и фрактална (Koch) диполна антена, която се вписва в кръглата, може да се покаже, че площта на фракталната е само 0.65 от площта на кръглата, докато периметърът (общата дължина) на същата антена е 2.615 пъти по-голяма.

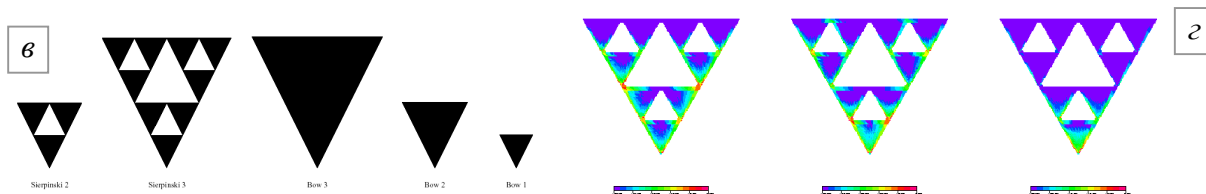
Друго приложение на планарните фрактални антени е създаването на много-обхватни антени с много малки площи. На Фиг. Д.2.38 са показани характеристиките в широка честотна лента на планарна фрактална антена на Sierpinski, която има действие около 5, 11 и 24 GHz. Антената има доста близки по характеристики диаграми на различни честоти с голяма разлика помежду им.



Фиг. Д2.37 Микролентова диполна фрактална антена на Koch: а) захранване; б) сравнение на линейна и фрактална антена; в) обратни загуби



Фиг. Д2.38 Микролентова планарна фрактална антена на Sierpinski: а) обратни загуби; б) диаграма на антената в далечната зона;



Фиг. Д2.38 (продължение) в) сравнение на обикновени триъгълни излъчватели и фрактални; г) разпределение на токовете за различни резонанси.

2.10 Сравнение между различни планарни антени елементи.

В Табл. Д.2.6 са сравнени някои от планарните излъчващи елементи, част от които са разгледани тук. Сравнени са техните важни характеристики като диаграма, насоченост, поляризация, честотна лента и някои техни основни предимства.










		<i>Pattern</i>	<i>Directivity</i>	<i>Polarization</i>	<i>Bandwidth</i>	<i>Comments</i>
<i>Patch</i>		Broadside	Medium	Linear/Circular	Narrow	Easiest design
<i>Slot</i>		Broadside	Low/Medium	Linear	Medium	Bi-directional
<i>Ring</i>		Broadside	Medium	Linear/Circular	Narrow	Feeding complicated
<i>Spiral</i>		Broadside	Medium	Linear/Circular	Wide	Balun & Absorber
<i>Bow-Tie</i>		Broadside	Medium	Linear	Wide	Same as Spiral
<i>TSA(Vivaldi)</i>		Endfire	Medium/High	Linear	Wide	Feed transition
<i>LPDA</i>		Endfire	Medium	Linear	Wide	Balun, Two Layer
<i>Leaky-Wave</i>		Scannable	High	Linear	Medium	Beam-steering, Beam-filling
<i>Quasi Yagi</i>		Endfire	Medium/High	Linear	Wide	Uniplanar, Compact

Табл. Д2.6 Микролентови и други планарни излъчващи елементи, сравнени по някои техни характеристики

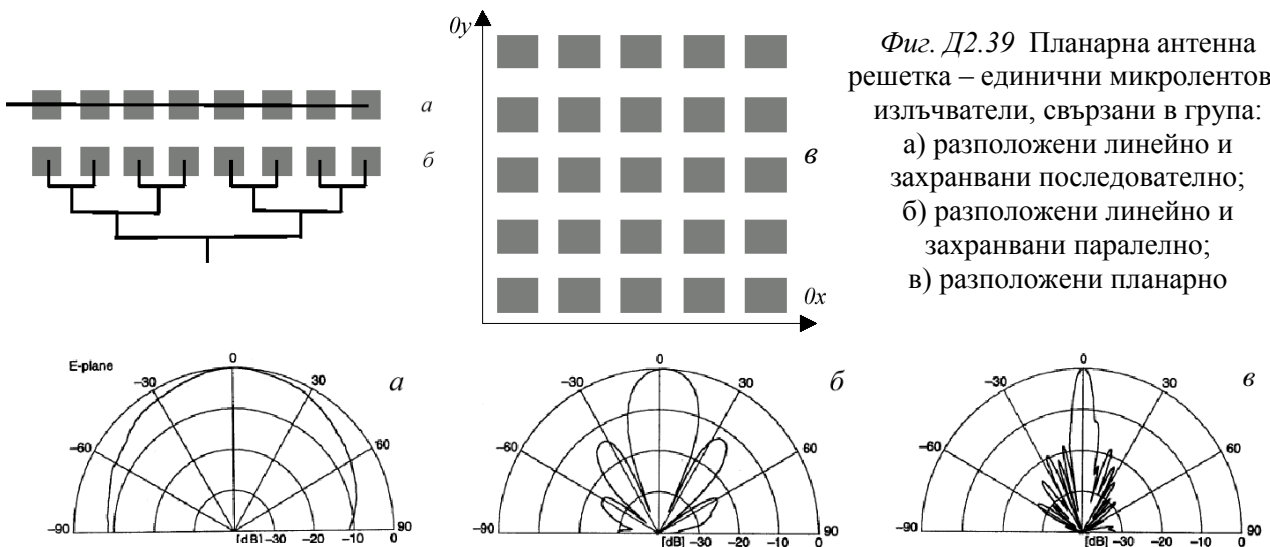
3. Микролентови антенни решетки (общо разглеждане)

Микролентовите единични, много-резонансни и многослойни антенни елементи в различни конфигурации имат много приемливи характеристики за много комуникационни приложения, но понякога се налага да имат свойства, които те не могат да осигурят. Такива нови свойства са по-голямо усилване (над 10-15 dBi), по-тясна честотна диаграма в дадено направление или в пространствен ъгъл, възможност за електронно сканиране на лъча и др.

Тук сме разгледали само някои най-общии проблеми (без математически анализ) на антенните решетки и методите за захранването им (технологични проблеми не са разглеждани).

3.1 Антенни решетки.

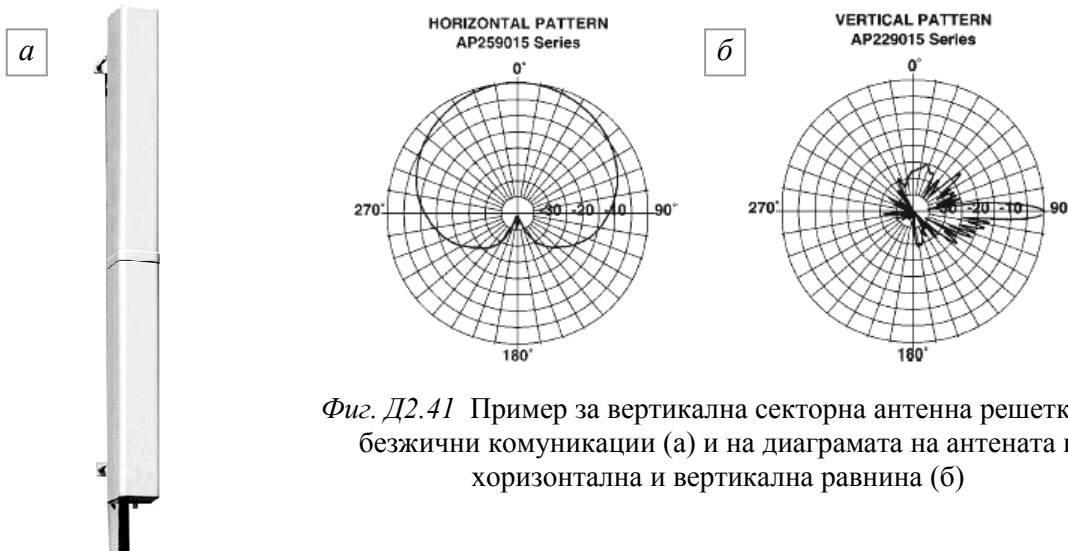
Антенната решетка е група от единични излъчватели, разположени в група (Фиг. Д.2.39) – линейно, планарно или пространствено. Начините за захранване на тези излъчватели се разглежда по-надолу. На Фиг. Д.2.40 е показан пример за изтъняване на диаграмата на антенна решетка с различен брой елементи и появата на странични листове към главния лист (лъч). Външният вид на една голяма антенна решетка и отделният елемент, който я изгражда – са показани на Фиг. Д.2.41.



Фиг. Д.2.39 Планарна антенна решетка – единични микролентови излъчватели, свързани в група:
 а) разположени линейно и захранвани последователно;
 б) разположени линейно и захранвани паралелно;
 в) разположени планарно

$$F_{array}(\theta, \varphi) = F_{patch}(\theta, \varphi) \cdot AF(\theta, \varphi),$$

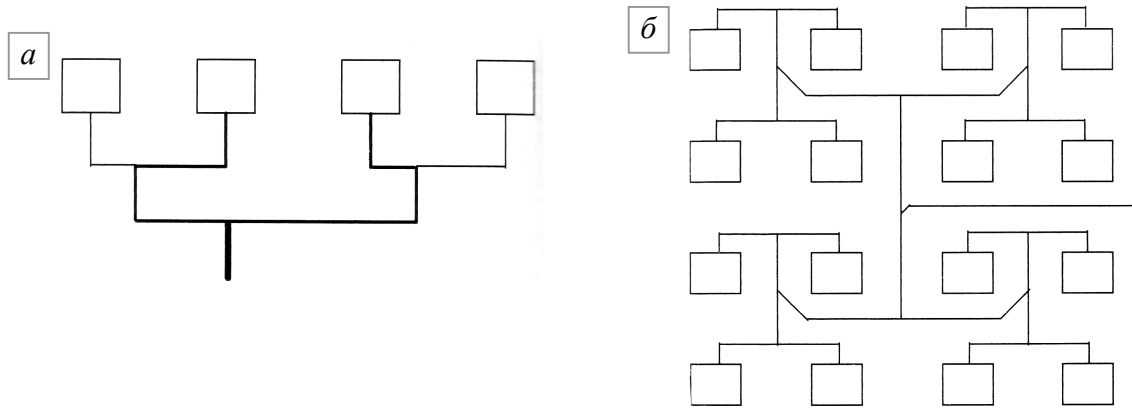
Фиг. Д.2.40 (долу) Диаграма на излъчване: а) на единичен елемент; б) на антенна решетка с 4×4 елемента; в) на антенна решетка с 4×16 елемента; долу – формула за диаграмата на решетка



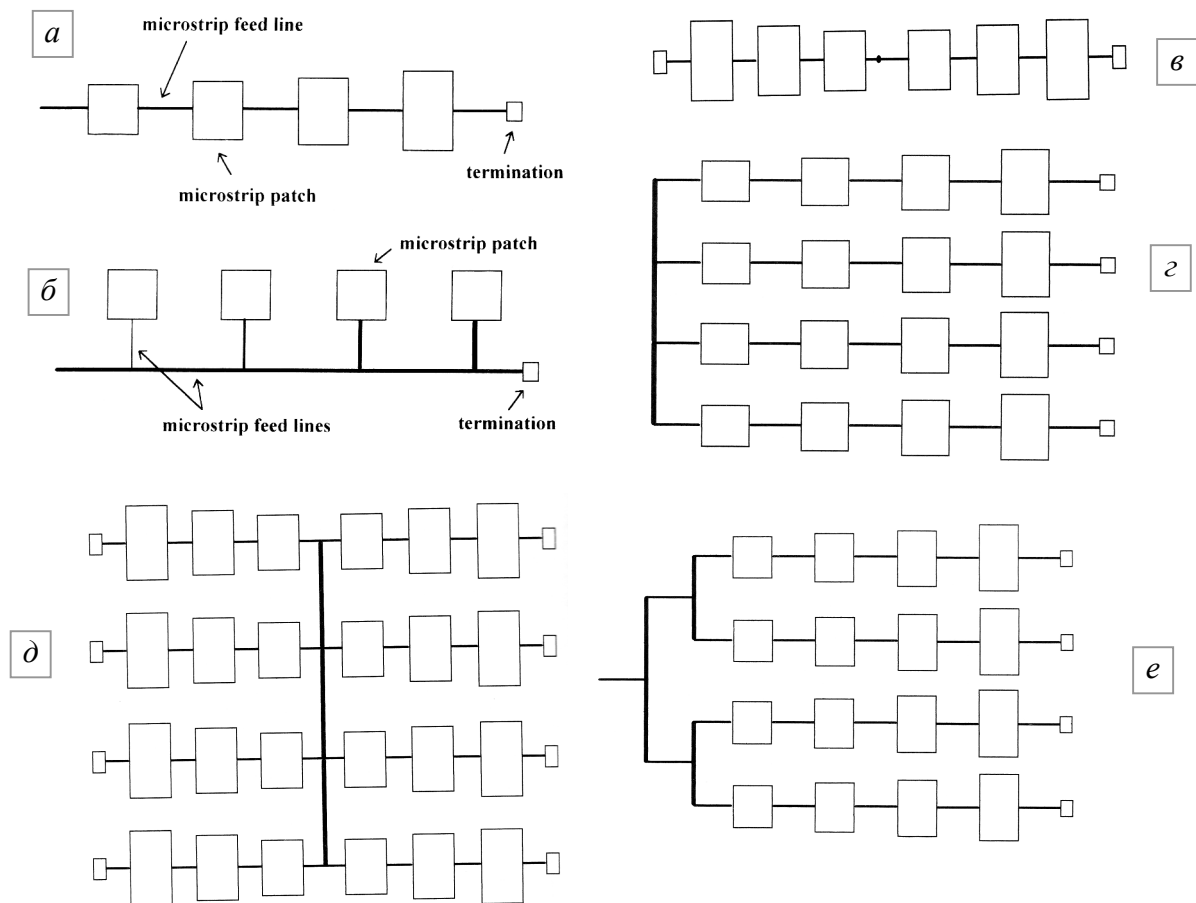
Фиг. Д.2.41 Пример за вертикална секторна антенна решетка за безжични комуникации (а) и на диаграмата на антената в хоризонтална и вертикална равнина (б)

3.2 Захранване на антенни решетки.

Съществуват два основни типа захранване на антенни решетки – паралелно и последователно. На *Фиг. Д.2.42* е показан пример за паралелно захранване. Този тип захранване се използва в антенни решетки с леко наклонен сноп, където основно се използва симетрията на структурата. Фидерната линия се проектира лесно; най-често се използват Т-образни разклонения. Фидерът има влияние върху диаграмата. Освен това, дължината на фидерните линии става доста голяма при големи решетки и загубите растат.

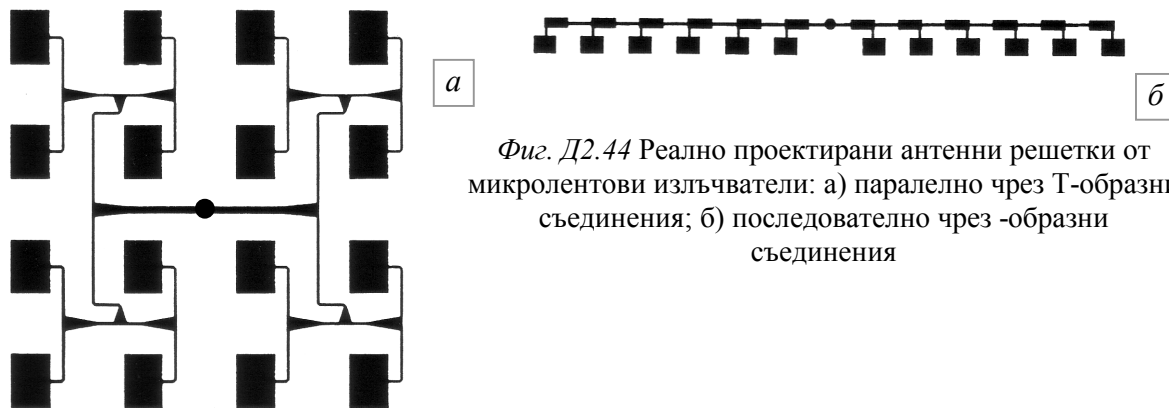


Фиг. Д.2.42 Паралелно захранване на микролентови излъчватели: а) на линейна решетка; б) на планарна решетка



Фиг. Д.2.43 Последователно захранване на микролентови излъчватели: а) излъчвателите са свързани последователно към фидера (интегрирани са в него); б) излъчвателите са свързани странично (шунтиращо) към фидера; в) последователно захранване в центъра на решетката; г) планарен последователен фидер с крайно захранване; д) същото, но с централно захранване; е) смесено паралелно-последователно захранване

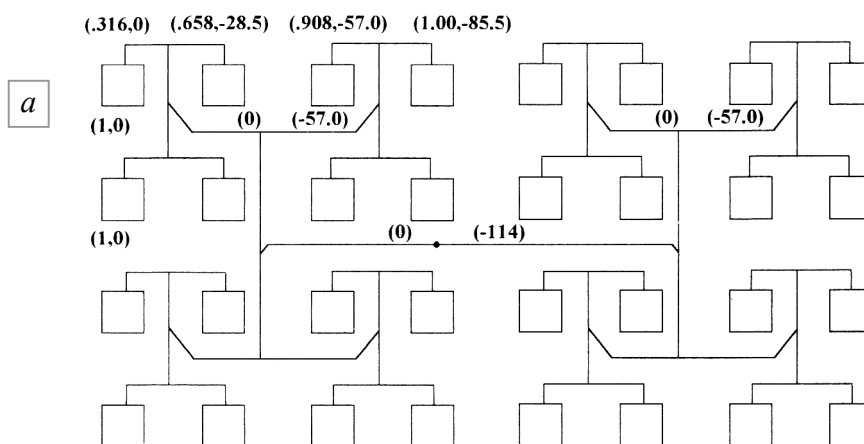
На *Фиг. Д.2.43* са показани няколко примера за последователно захранване. Има два различни варианта за последователно захранване. При единият излъчвателите са свързани последователно към фидера (т. е. интегрирани са в него) – *Фиг. Д.2.43а*, а при другия – те са свързани странично (шунтиращо) към фидера – *Фиг. Д.2.43б*. И в двата случая проектирането на последователната фидерна линия е по-сложно: трябва да се контролира амплитудата на подавания сигнал към всеки елемент, което става чрез импеданса на микролентовата линия (респективно, чрез ширината ѝ).



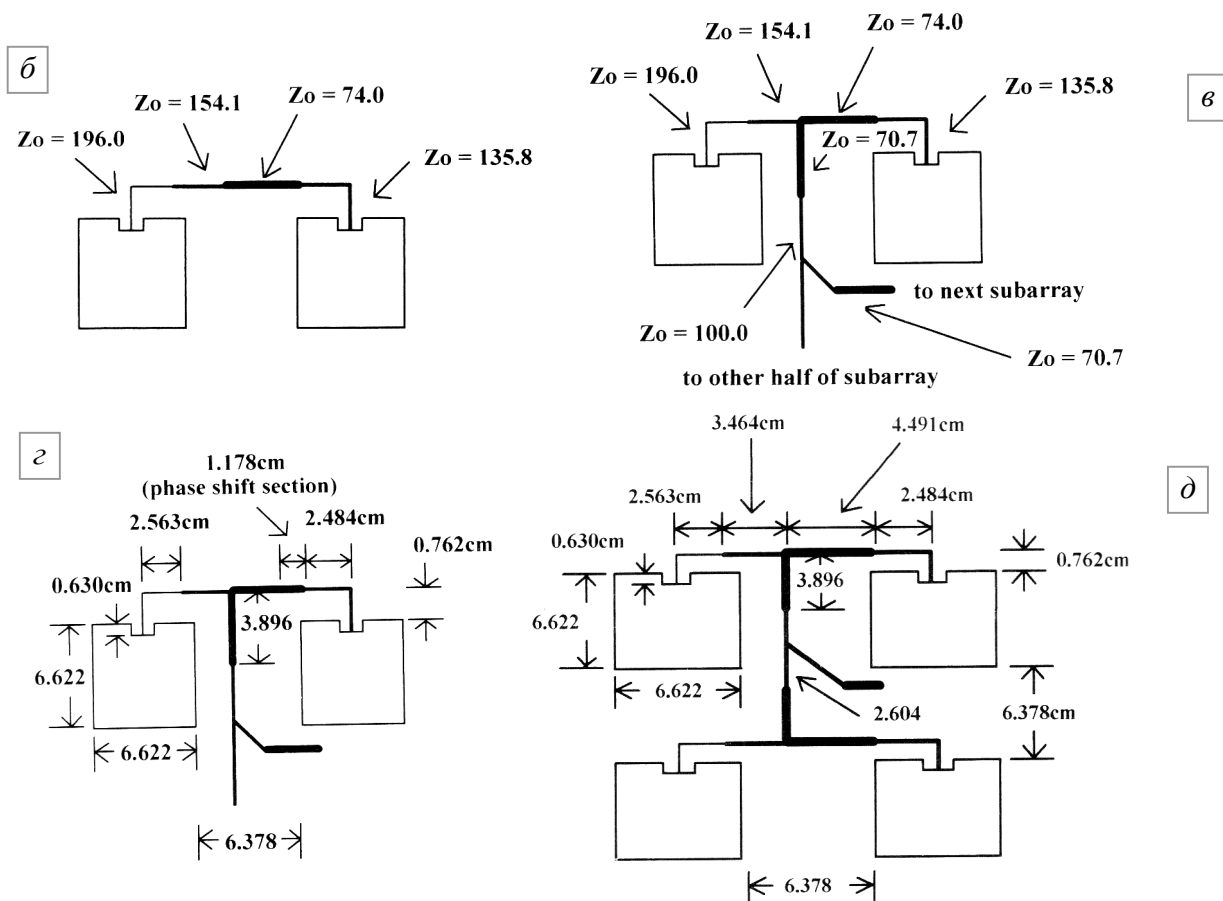
Фиг. Д.2.44 Реално проектирани антенни решетки от микролентови излъчватели: а) паралелно чрез Т-образни съединения; б) последователно чрез Т-образни съединения

3.3 Проектиране на захранването на антенни решетки.

На *Фиг. Д.2.45* е даден пример за проектиране на захранващите паралелни фидерни линии на антенна решетка с правоъгълни излъчватели. Общият вид на крайната антенна решетка е даден на *Фиг. Д.2.45а*. Първо се проектира връзката между два съседни излъчвателя – *Фиг. Д.2.45б*, като отношението на мощността на сигнала трябва да е 2.0823:1. За да се създаде това съотношение е необходимо да се проектира и Т-образното съединение с подходящ четвърт-вълнов трансформатор – *Фиг. Д.2.45в*. Всички закривявания се скосяват под оптимален ъгъл, за да се намали SWR. Проектираната част е 1/8 от антенната решетка; проектирането на останалите Т-съединения е лесно. На *Фиг. Д.2.45г,д* са дадени и конкретните размери на структурата, ако тя е проектирана за 1.5 GHz върху подложка с диелектрична проникваемост 2.2 и дебелина 1.6 mm.



Фиг. Д.2.45 Пример за проектиране на паралелен фидер на 8 x 4 антенна решетка: а) общ вид на решетката (числата в скобите са проектираните стойности на амплитудата и фазата на сигнала в съответните точки)

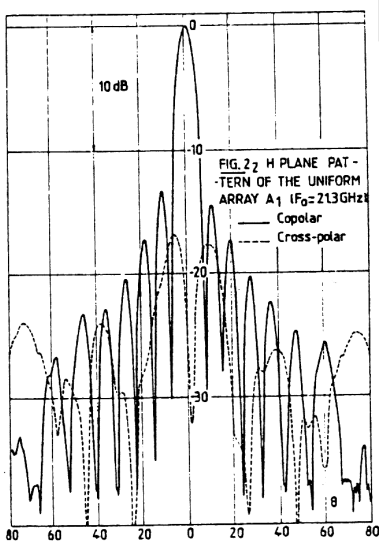
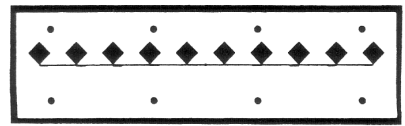
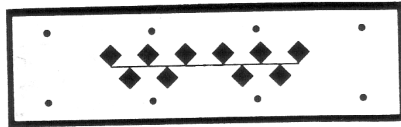
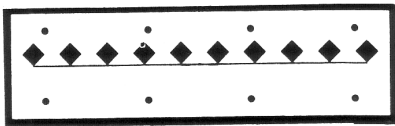


Фиг. Д.2.45 (продължение) Пример за проектиране на паралелен фидер на 8 x 4 антенна решетка: б) проектиране на хранването на два съседни елемента; в) проектиране на Т-разклонението (данните са в импеданс и се отнасят за произволна честотна лента); г) същото, както във в), но за решетка за 1.5 GHz върху подложка с диелектрична проницаемост 2.2 и дебелина 1.6 mm; д) общ вид на проектираната четворка от излъчватели. Накрая, това проектиране може да се провери чрез числена симулация с ЕМ симулатор

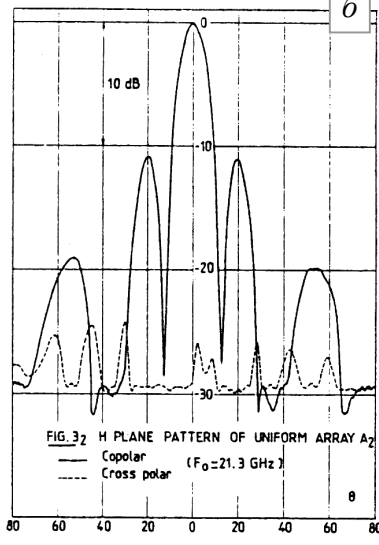
3.4 Влияние на архитектурата на антенната решетка върху диаграмата ѝ.

В този раздел е даден кратък пример за влиянието на архитектурата на планарна микролентова решетка върху нейната диаграма. На Фиг. Д.2.46 е даден пример за 4 различни решетки и са сравнени техните диаграми (конкретната честота е без значение). Регулярна линейна (едномерна) антенна решетка А1 (Фиг. Д.2.46а) има добри характеристики – странични листа на -15 dB, но крос-поляризацията е лоша: почти -17 dB. Този параметър може съществено да се подобри (под -25 dB), като се използва регулярна линейна антенна решетка А2 с алтернативно разположени излъчватели (Фиг. Д.2.46б), но странични листа сега са на -11 dB. Най-добри характеристики има нерегулярна линейна антенна решетка А3 с оптимално избрано разстояние между излъчвателите (Фиг. Д.2.46в). Тя има тясна лента само по единия ъгъл. Подобни характеристики има и планарната решетка (Фиг. Д.2.46г), като при нея диаграмата е тясна и по двата сферични ъгъла, а насочеността е по-голяма.

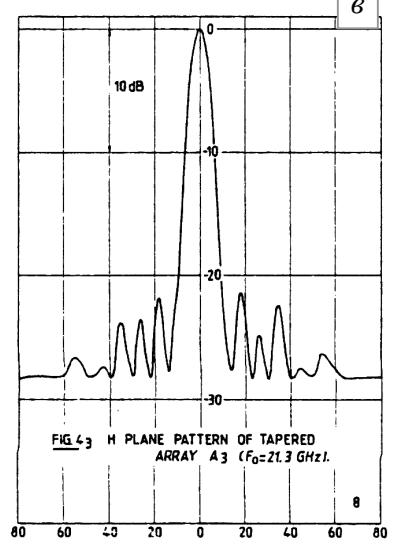
Тези примери сме използвали при проектиране на линейни решетки с различни характеристики в честотния обхват 3.5 GHz.



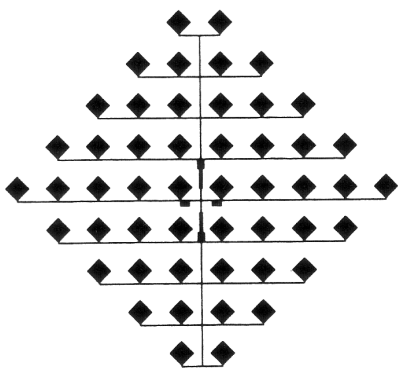
a



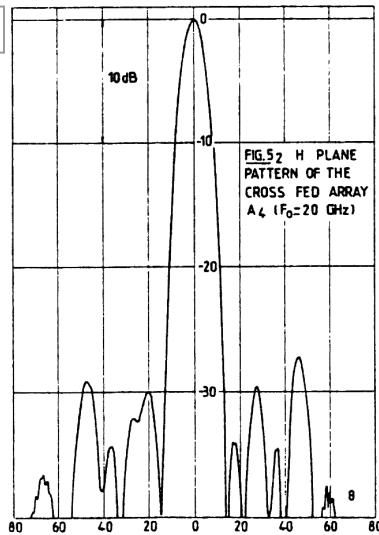
б



в



г



Фиг. Д2.46 Различни по архитектура
антенни решетки с ромбовидни
излъчватели и техните диаграми:
а) Регулярна линейна (едномерна)
антенна решетка A1;
б) Регулярна линейна (едномерна)
антенна решетка A2 с алтернативно
разположени излъчватели;
в) Нерегулярна линейна (едно-
мерна) антенна решетка A3 с
оптимално избрано разстояние
между излъчвателите;
г) Планарна антенна решетка A4 с
коаксиален изход