

ИНТЕРМОДУЛАЦИОННИ ИЗКРИВЯВАНИЯ В АУДИО БЕЗЖИЧНИТЕ СИСТЕМИ И КАК ДА СЕ СПРАВИМ С ТЯХ

Ас. Стоян Бозов

INTERMODULATION DISTORTION IN WIRELESS AUDIO SYSTEMS AND HOW TO DEAL WITH IT

Stoyan Bozov, Academic Assistant

Резюме:

Аудио безжичните системи не са нищо ново на пазара, използват се от десетки години и едва ли не след добавянето на цифровите трансмисии на 2.4GHz не е имало нещо иновативно и революционно в тяхното развитие. Отдавна са част от всяка сцена, всяка рентал компания, всеки концерт на живо, тв предавания и т.н. Но технологията, която стои зад работата им е чужда за мнозина. Нещо повече, хора които работят на всекидневна база с подобни устройства се оказва, че не могат правилно да анализират и диагностицират проблемите, с които потребителите се сблъскват. Темата, която ще разгледаме в тази статия е свързана с безпроблемността на работа на две и повече устройства в еднакъв честотен диапазон и в силно замърсена радио среда.

Ключови думи:

безжични устройства, музика, медийни технологии, интермодулационни изкривявания, звукови вълни

Abstract:

Audio wireless systems are nothing new on the market—they have been used for decades, and since the introduction of digital transmissions in the 2.4 GHz range, there has been little innovation or revolutionary advancement in their development. They have long become a staple of every stage, rental service, live concert, and television production. However, the technology behind their operation remains unfamiliar to many. Even more concerning is that professionals

who work daily with such systems often lack the knowledge to properly analyze and diagnose the issues users keep facing. This article explores the challenges of ensuring interference-free operation of two or more wireless devices within the same frequency range, particularly in environments with high levels of RF congestion.

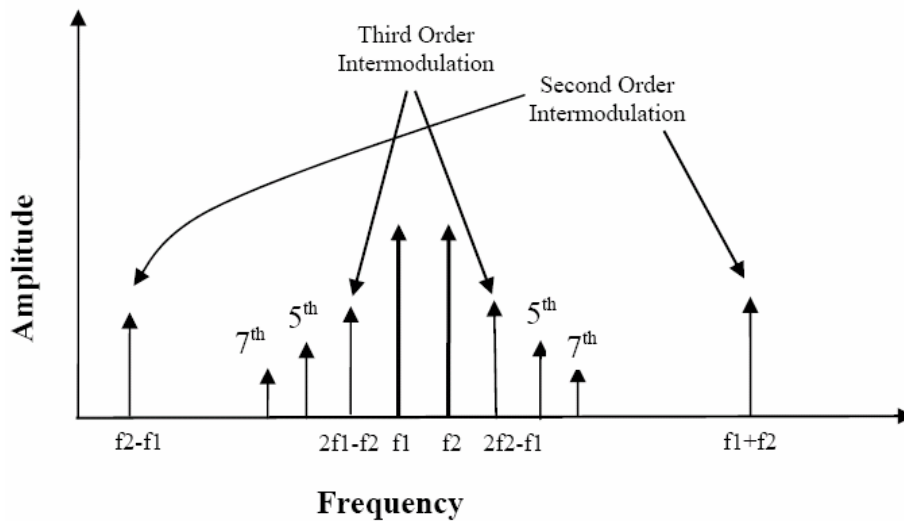
Keywords:

wireless devices, music, media technologies, intermodulation distortion, sound waves

Нека да поставим един въпрос още в самото начало. Кое е общото между добрият стар радиоприемник, нашият слух, акордово тризвучие изсвирено на пиано, миниатюрен високоговорител на мобилен телефон и най-обикновен усилвател в аудио система? Освен, че всички изброени са свързани чрез общото понятие звук, истинският отговор всъщност се съдържа в заглавието на темата и това са именно интермодуляционните изкривявания. Преди да ги дефинираме, трябва да споменем, че интермодуляционните изкривявания могат да се случат между две или повече вълни в нелинейна среда. Вълните трябва да са в обща среда, трябва да са еднакви по характер. Не можем да имаме интермодуляционни изкривявания между звукова вълна и светлинна вълна, или между звукова вълна и електромагнитна вълна, каквато е всъщност радио вълната, поради огромната разлика в честотите. Тоест те възникват между близки по честота вълни, в сходна, хомогенна среда и сходни по амплитуда. В природата знаем, че вълните спокойно преминават свободно една през друга (Фиг. 1).



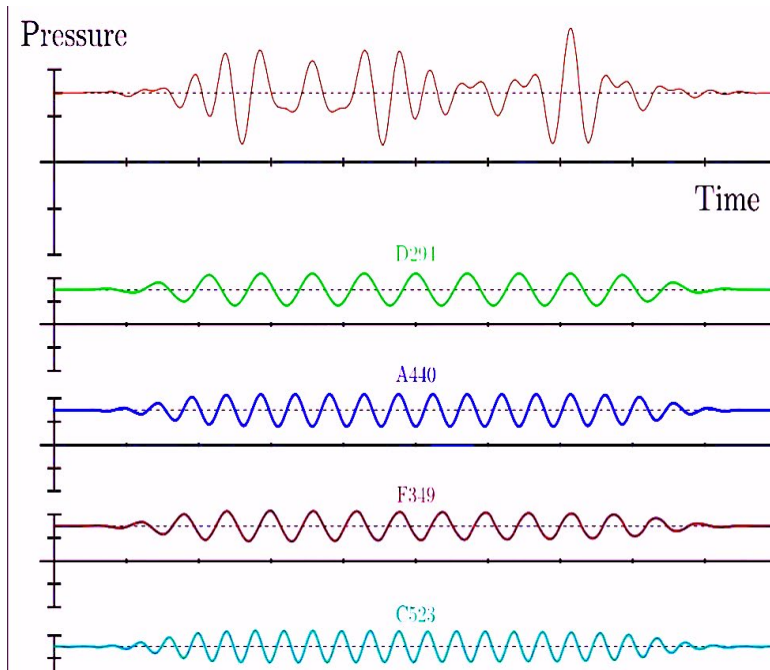
фиг. 1



фиг. 2

Когато това преминаване се случи в нелинейна среда обаче, те създават някои странични компоненти, т. е. създават странични вълни. Но следва въпросът какво точно е нелинейната среда и с какво тя променя поведението на вълните? Нелинейна среда може да бъде усилвател, може да бъде нашият слухов апарат като своеобразен тип усилвател. Може да бъде и най-обикновен радиоприемник, в който като се смесят два сигнала, се създават нови, паразитни на тези сигнали – интермодуляционни изкривявания от трети ред.(фиг. 2)

Най-простата вълна във Вселената е синусоидалната вълна. Освен математическа функция тя може да е и звукова. Няма човек който не е чувал синусоида, но вероятно повечето хора си нямат представа как точно звучи. Важно е да се дефинира, че всички звуци, в чуваемия диапазон 20hz-20khz, колкото и комплексни да са те, могат да бъдат сведени до прости синусоиди. Всички сложни периодични трептения се свеждат до основни тонове и техните обертонове(хармоници), а всеки обертон е синусоида и не може да бъде по-сложен. Дори шумовете могат да бъдат сведени до синусоиди от хиляди различни честоти. Това в математическия свят се получава чрез алгоритъм наречен Fast Fourier Transform или Разлагане по реда на Фурие.



фиг.3

За да разберем какво се крие зад една сложна вълна, каквато е най-горната, показана на фиг. 3, трябва да я сведем, чрез разлагане по реда на Фурие, до нейните прости съставни части, каквито са по-долните периодични синусоидални вълнови форми. Това ни позволява да разложим произволен комплексен звук на прости елементарни звуци и да чуем отделни тонове в акорд, или да разграничим различен тембър в една обща звукова картина. Поглеждайки първоначалната вълна едва ли можем да декодираме, че зад нея стои музикално съдържание, но поглеждайки долните четири вълни става ясно, че това е комбинация от четири периодични звука с височина съответно Ре, Фа и Ла от първа и До от втора октава. Комбинацията от тези тонове образува четиризвучието Ре минор 7. Жозеф Фурие(1768-1830) е френски математик, който пръв е стигнал до извода, че дори най-сложните математически функции могат да се сведат до прости синусоидални, или косинусоидални функции. Това е особено полезно когато говорим за звук. А нашият мозък извършва подсъзнателно тези сложни изчисления, разлагайки комплексните звуци, които достигат до нашите уши на прости, благодарение, на което можем да разпознаем акордът, който седи зад тази сложна вълнова форма (фиг. 3).

По дефиниция всеки един звук, който чуваме съдържа, обертонове. Понякога кратни на основния, понякога – не. Това е и дефиниционната разлика между тон и шум. Всяка една струна вибрира освен с пълната си дължина и с половината си, и с една трета, една четвърт и т.н. Тези кратни тонове сформират тембъра, чрез който ние разпознаваме на какъв инструмент принадлежи тази струна. А нашият мозък разпознава този тембър на базата тази сложна трансформация. Той е нелинейната среда, в който звуците чрез сумирането си създават слухово усещане за нещо различно от съставните.

Друг слухов феномен е възможността ни да чуваме тонове, които не са част от акорд, но се появяват в следствие комбинацията от определени обертонове на другите тонове, които са изсвирени – комбинационни тонове. Пример за това е ако изсвирим ниска кварта на пета и шеста струна на дистортирана електрическа китара често пъти ни се случва да чуем тон, чиято височина е октава под високия тон в квартата. Или иначе казано основен тон октава под изсвирения. Подобен на феномена на възстановяване на липсващия основен тон е и начинът, по който слухът изгражда ритъм дори при отсъствие на реален звуков сигнал. Човешкият мозък създава вътрешна временна структура въз основа на контекст и предишен музикален опит, което води до възприемане на пулсация, която не съществува обективно в аудиосигнала. Както отбелязва Емануела Крондева: „Пулсацията в музиката следва да се разглежда не като присъщо свойство на музикалната структура, а като психологическа конструкция, формирана от възприятието на слушателя.“ (Крондева, 2025: 49) Този психоакустичен механизъм стои и зад комбинационните тонове – честоти, които не присъстват реално, но се „дочуват“ благодарение на обертоновото съдържание и възстановителната способност на слуха. Това се получава така заради възможността на човешкия слухов апарат да възстановява звук до неговата пълнота въпреки, че не чува цялата звукова картина. Обикновено два или три последователни обертона от цялата редица са ни достатъчни, за да си възстановим липсващият основен тон. Дисторшъна в случая ни помага, защото той подсилва обертоновете. Той е именно факторът „нелинейна среда“ (non-linearity).

Приложението на този феномен е най-ясно изразено в начина, по който слушаме музика от телефоните си. Миниатюрният високоговорител едва ли е способен да изсвири честоти под 100hz, а дори и по-високите ниски среди биват изсвирени значително по-тихо от диапазона 1000-4000hz,

където говорителят е най-активен. Но въпреки това на нас не ни пречи да чуем основния тон на хармонията изсвирен от баса в някое музикално парче, независимо, че неговата форманта лежи доста по-ниско от реално просвирения диапазон. Докато има чуваеми обертонове нашите уши няма да има проблем да възстановят липсващите честоти и да чуем тона, който не е просвирен от системата. Понякога има проблем с много ниски съб басове, които са генерирани от осцилатори и в тях липсва обертоново съдържание. Това е и причината поради, която в съвременната музика много от съб басовете биват изкуствено изкривени (дистортирани), за да получат допълнително хармонично съдържание (обертонове). Това ги прави чуваеми на системи които реално не могат да свирят толкова ниски честоти – телефони, телевизори, говорители на лаптоп и т.н. Примерът демонстрира практически къде срещаме нелинейни интермодуляционни изкривявания във нашето всекидневие и ни помага да ги дефинираме в един по-сложен и по-рядко срещан, но не по-малко важен за професионалистите контекст.

В контекста на безжичните радиопредавателни системи имаме подобен феномен, който се ражда в самото приемно устройство. Първият закон на радиопредаването се нарича смесване. Ако смесим два радио сигнала ще получим сумата и разликата на двата сигнала като два субпродукта. Да кажем, че имаме сигнали на 500 и 600 MHz, то ние получаваме сумата и разликата съответно 1100 и 100 MHz. Втория закон на честотното радио предаване е, че всеки сигнал който генерираме на определена честота създава кратни на тази честота хармоници (подобно на обертоновата редица при музикалните инструменти, която споменахме по-рано). Ако генерираме сигнал на

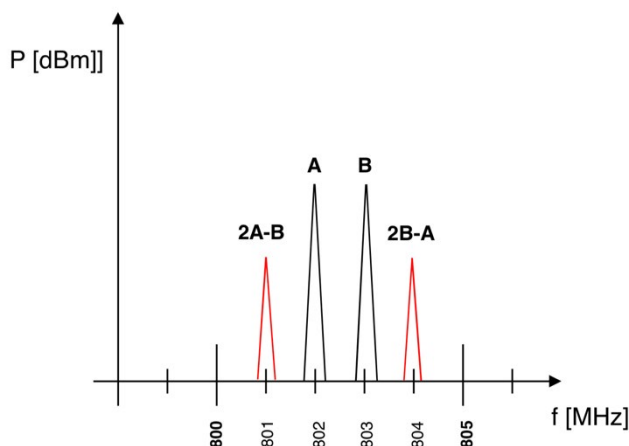
$f=100\text{MHz}$, то ние ще получим пропорционални по-тихи

$2f=200$,

$3f=300$

$4f=400$ и т.н.

Ако предположим, че имаме два сигнала с честоти $A=802\text{MHz}$ и $B=803\text{MHz}$, то в нашия приемник съобразно гореспоменатите закони ще бъдат регистрирани и паразитни сигнали на следните честоти:



$$A+B=1605$$

$$B-A=1$$

$$2A=1604$$

$$2B=1606$$

$$2A+B=2407$$

$$2B+A=2408$$

$$2A-B=801$$

$$2B-A=804$$

$$2A+2B=3210$$

$$2B-2A=2$$

фиг. 4

....***

Повечето от тези честотни субпродукти не ни притесняват – те или са далеч извън диапазона на нашия приемник, или биват филтрирани от вътрешните интегрални схеми за филтриране на нежеланите честоти. Но $2A-B$ и $2B-A$ са точно в нашия диапазон и то в непосредствена близост до нашите първоначални честоти. Те се появяват именно в следствие от

интермодуляционните изкривявания от трети ред настъпили в применика (нелинейна среда) И все пак разликите между всяка от тях и нашите изходни честоти са точно толкова колкото и разликите между А и В. Тоест проблем не би трябвало да има. Особено ако се касае само за 2 устройства с 2 честоти. Все пак $2A-B$ никога не може да бъде равно на $2A$ или $2B$ докато $A \neq B$. Ако $A=B$ тогава и $2A-B=A=B=2B-A$. Но тогава бихме имали доста по-сериозен проблем от тези допълнителни честоти.

Ако увеличим броя на устройствата обаче, комбинациите на тези паразитни честоти се увеличават експоненциално. За 3 у-ва вече имаме 6 нови честоти в непосредствена близост, за 4 имаме 12, за 5 имаме 20 и т.н. за n честоти имаме $n(n-1)$ интермодуляции от трети ред. Колкото повече устройства имаме толкова шанса за потенциален проблем се увеличава.

Но нали във всички съвременни безжични микрофони имаме scan функция, чиято идея е да сканира честотния радио обхват и да намери свободни позиции. Нека разгледаме хипотетичен сценарий, при който имаме 2 честоти

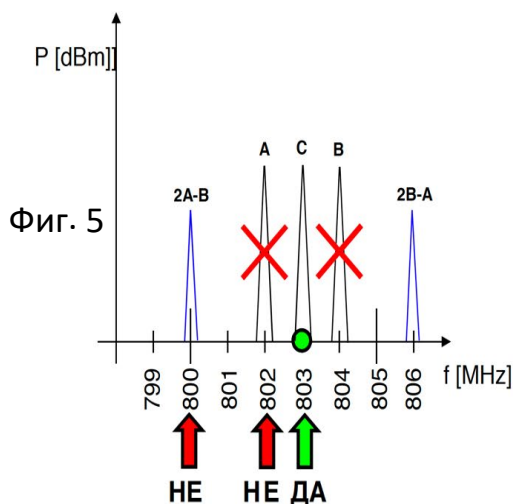
$A=802$ и $B=804$ Mhz

Скан Функцията би пропуснала

$800=2A-B$, би пропуснала

$A=802$ MHz и вероятно би открила

803 като свободна честота. $C=803$



Нашата безжична система
предлага следните честоти:

~~800.000 MHz~~
~~802.000 MHz~~
803.000 MHz ✓

На сцената има два предавателя на:

$A = 802.000$ MHz and $B = 804.000$ MHz

$2 \times 803 - 802 = 804$ MHz ✗
 $2 \times 803 - 804 = 802$ MHz ✗

Тогава ще получим интермодулация $2C-B=A$ и $2C-A=B$, което съвпада с нашите първоначални честоти, убивайки ги ефективно. Тогава с новата честота C няма да има проблем, но ще създаде такъв – фиг. 5 за останлите две – A и B .

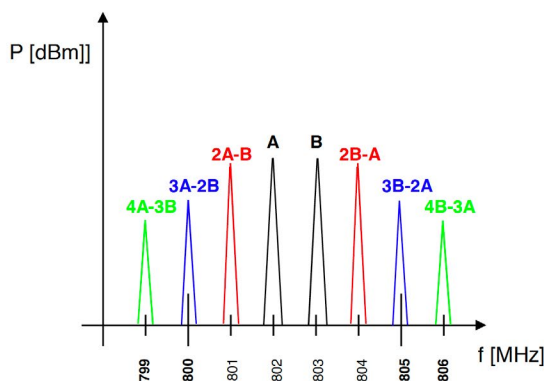
Този пример показва не само, че скан функцията не е ефективна, но и че имаме нужда от много по-интелигентен честотен координационен подход. Така наречения честотен план. За по-големи системи това може да се реши с професионален софтуер или с екселска таблица, която да смята евентуалните честотни презастъпвания на основни честоти с техните интермодулационни продукти.

Но какво точно е звуковото измерение на интермодулационните изкривявания и какви проблеми може да създаде то? От една страна, тъй като те не са чисти изкривявания в звука, а презастъпвания в RF спектъра, може да не разграничим изкривяване в звука. В следствие увеличаване на разстоянието приемник-предавател може да се получи смесване на сигналите между едното и другото устройство и звука рязко да деградира. Ако сме близо до применика може дори да не разберем, че имаме съвпадение на интермодулационна честота точно върху носещата ни честота. При наличие на препятствие – човешко тяло, колона, екран, стена RF сигнала силно намалява. С два пъти увеличаването на разстоянието той намалява с 6 дБ, човешко тяло на пътя на сигнала отнема около 25 дБ от сигнала. Така, че проста сметка показва, че лесно можем да достигнем до предел, при който интермодулирания сигнал да стане по-лесен за приемане от приемника и да доведе до внезапно деградиране на основния такъв, или дори до неговото изчезване.

Не можем ли да разрешим този проблем с просто усилване на нашия радио сигнал? Съществуват LPDA антени, които усилват сигнала със 6 дБ, in-line усилватели, които добавят 10 дБ към радио сигналът преди той да достигне до приемника. Освен това повечето предаватели имат и различни режими на мощност на излъчването. Стандартите при аналоговите микрофони са 10, 30 и 50 mW. Противно на логиката, че усиленото излъчване и приемане ще доведат до по-стабилна и качествена радиокомуникация, всъщност се създават предпоставки за RF Distortion. Подобно на прекомерното усилване на звуковия сигнал, което води до нелинейни изкривявания, усилването на

радио сигнала също би могло да доведе до такива. Кое то от своя страна ще усилва значително кратни хармонични честоти $2f$, $3f$, $4f$ и така ще създаде предпоставки за доста по-силни интермодуляционни изкривявания от 3-ти, 4-ти и т.н. ред. Поради това се налага да изчислим и силата на RF сигнала. Често пъти решението на проблеми с интермодуляциите между няколко безжични устройства се оказва не усилването, а намаляването на мощността на излъчване. Това решение обаче се нуждае от изнесени антени, които да минимизират разстоянието предавател-приемник. Такива антени обикновено се поставят на самата сцена, докато физическите приемници са изнесени извън нея. При твърде силен RF сигнал интермодуляциите от 4-ти, 5-ти и т.н. ред стават достатъчно сериозен фактор. Такива интермодуляции съществуват и при нормално силен RF сигнал, но просто са значително по-тихи и не оказват влияние.

ТВЪРДЕ МНОГО ГЕЙН:



A = 802 MHz

B = 803 MHz

2A - B = 801 MHz 2B - A = 804 MHz

3A - 2B = 800 MHz 3B - 2A = 805 MHz

4A - 3B = 799 MHz 4B - 3A = 806 MHz

Освен това сега има възможност за генериране на интермодуляции от повече от две честоти:

примери:

A + B - C

3A - B - C

2A + B - C - D

2A + B - 2C

A + B + C - D - E

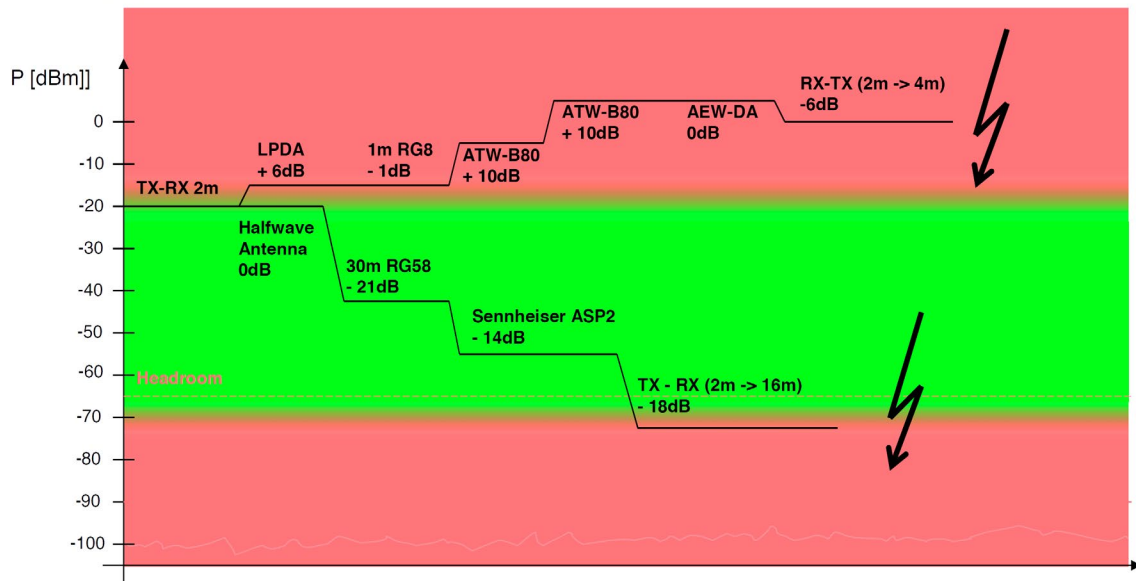
2A + B + C - 2D - E

A + B + C + D - E - F - G

...

фиг. 6

RF-GAIN

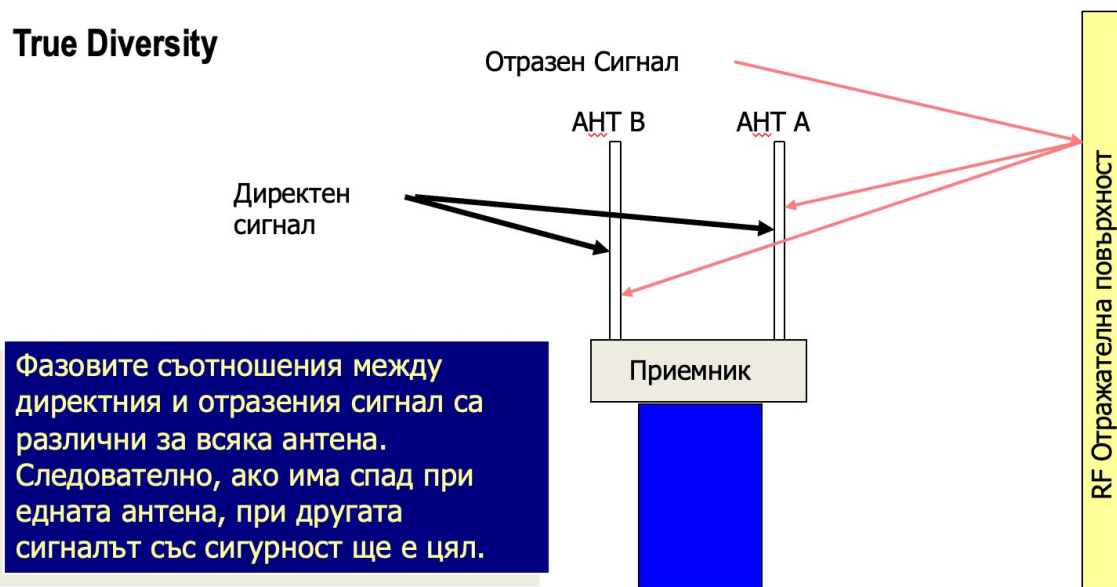


фиг. 7

Силата на RF сигнала можем да регулираме възползвайки се от така наречения гейн-стейджинг. Тоест чрез изграждането на цялостен план на мястото, позицията, бройката на устройствата, антените, дистрибуторните устройства, сплитерите и комбайнерите. Всеки компонент по веригата на радио сигнала има огромно значение. 10м RG58 кабел отнема ~ 7дб от нивото на сигнала, докато 10м RG8 отнема едва 1.7дб. Всеки BNC конектор отнема по около 0.5дб. Пасивна дистрибуционна система тип сплитер отнема по 4дб на сплит. Човешкото тяло както казахме отнема по около 25дб. В плана трябва да се вземе под внимание какъв ще бъде обхвата на движение на изпълнителя. Ако трябва да покрием огромна площ разполагането на няколко двойки LPDA антени е вариант, но крие някои опасности. Подобно на звуковите вълни RF вълните също могат да изпаднат в противофаза. В такива ситуации няколко двойки антени могат да доведат до улавяне на RF сигнал в противофаза и при комбинирането на линиите от тези антени в приемника да се окаже, че губим солидна част от сигнала. Понякога решението може да бъде избора на трансмисии, които работят на по-ниски честоти. Тъй като ниските честоти имат по-дълъг обхват заради по-дългата дължина на вълната и свойство дифракция е по-добре изразено. Тоест заобикалят препятствия по-успешно. Ако една вълна има дължина 50 см това означава,

че всяко препятствие което отнема „пряката видимост“ може да „смути“ сигнала. Разбира се радио сигналите също имат свойството да се сблъскват с повърхности и да се отразяват подобно на звуковите вълни. Поради това ние няма да загубим обхват ако има препятствие между нашия предавател и приемник. Съвременните безжични системи са сравнително интелигентни и разполагат с така наречената функция true-diversity. Тя включва присъствието на две антени, всяка от които е независима и лови „своя версия“ на сигнала. Понякога директния сигнал, който достига до нашия приемник е по-слаб от отразения такъв и лесно може да се сумира в противофаза с отразения. В такива случаи наличието на две антени ни позволява да сме сигурни, че поне при едната антена сигналът ще е във фаза. В този случай приемника може безпроблемно да превключва сигналите от двете антени, като през цялото време прави сравнение и избира по-добрия. За да максимизираме ефекта на true diversity е добре да позиционираме антените под 90° и да се избягва тяхната успоредност. Това позволява максимални фазови разлики между двете. (фиг. 7)

True Diversity



фиг. 8

В Заключение можем да кажем, че където не е наистина наложително да се използват безжични устройства е най-добре да се придържаме към традиционните кабелни решения. Не само заради изброените проблеми в тази статия, но и поради факта, че при безжични системи реално се използват много повече кабели. Икономически също е по-изгодно да използваме традиционна кабелна система. Разбира се понякога приложението изисква свобода на движението. А и с наличието на мобилен и wi-fi интернет вече сме свикнали с отсъствието на кабели. И все пак ако не можем да си спестим употребата на безжична система, трябва да знаем какви подводни камъни крие това. А на въпросът защо целият свят комуникира вече безжично, а аудио света сякаш е изостанал в това отношение ще отговоря с едно изречение. При събитие, което се случва на живо, в което звукът се пренася в реално време от изпълнител към публика, няма място за никакви грешки и компромиси с непрекъснатостта и качеството на сигнала, докато при безжичната интернет комуникация ние дори не разбираме за всички смущения, които се случват. А и секунда, две закъснение в сигнала никой няма го притеснят, докато в аудиото това е напълно недопустимо.

Референтна литература

Крондева, Е. (2024). Аранжиментът като средство за музикално възприятие. *Музика. Мултимедия. Култура*, 1(2), 39-55.

Данни за автора / Author Information

Ас. Стоян Бозов

Докторант / Асистент

Софийски Университет „Св. Климент Охридски“, катедра ММТ

E-mail: sbozov@uni-sofia.bg

Основни научни области: Аудио технологии, имърсив аудио, образователни подходи в звуковите изкуства.