

A COMPARATIVE ANALYSIS OF DIGITAL SPECTRUM ANALYZERS

Slavov S. Delyan, Marinova K. Nataliya, Radev Y. Ivan

*Communication Networks and Systems Department, Artillery, Air Defense Communication and Information Systems Faculty, National Military University „V. Levski”, Shumen, Bulgaria
slavovd@yahoo.com , nati.98@abv.bg, secterity@abv.bg*

Abstract: The article analyses the principles of construction of digital signal analyzers, methods for analysis of the electromagnetic environment and the parameters, affecting the accuracy of the measurement. On this base several conclusions are substantiated, which could be useful in the development of methodologies for research the effectiveness of electromagnetic spectrum's usage by different radio-communication systems.

Keywords: spectrum analyzer, spectrum analyzer characteristics

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ЦИФРОВИ СПЕКТРАЛНИ АНАЛИЗАТОРИ

Делян С. Славов, Наталия К. Маринова, Иван Й. Радев

*Катедра „Комуникационни мрежи и системи“, факултет „Артилерия, противовъздушна отбрана, комуникационни и информационни системи“, гр. Шумен, България
slavovd@yahoo.com , nati.98@abv.bg, secterity@abv.bg*

I. УВОД

Електрическият сигнал ($A(t)$) е важно понятие в електрониката и в комуникациите и представлява времевата зависимост на тока или напрежението в дадена електрическа верига, но и на електрическото E или магнитното поле H на разпространяваща се в дадена среда вълна [2]. Най-общо математическото описание може да се даде с уравнението

$$A \sin 2\pi f t = A \sin 2\pi f t + \phi , \quad (1)$$

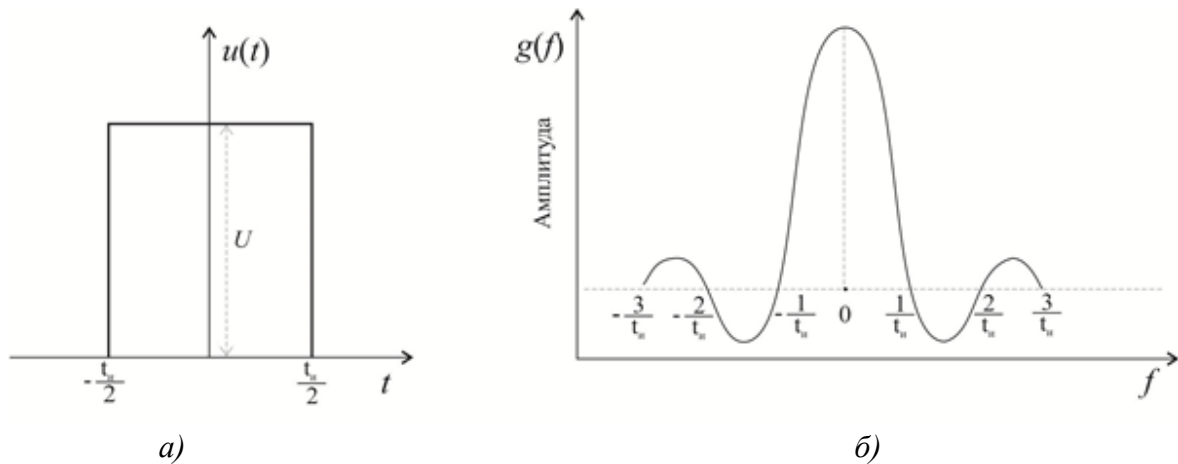
където A е амплитудата на сигнала, f – честота, а ϕ – началната фаза.

При това електрическите сигнали могат да бъдат класифицирани, като аналогови, цифрови, периодични, непериодични и случайни или шумови.

През 1806 г. Ж.-Б. Фурие показва, че всяка сложна периодична функция (сигнал) може да се представи като сума от хармонични (синусоиди и косинусоиди) с различна амплитуда и определени фазови съотношения между тях, която днес е прието да се нарича ред на Фурие. Ако сигнала

лът не е периодичен, при анализа на неговите свойства може да се използва спектралната му функция [3]:

$$g(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) \cos 2\pi f t dt, \quad (2)$$



Фиг. 1. Представяне на правоъгълен сигнал във времева(а) и честотна област(б)

Например, за единичния импулс, със значения $U(t) = U$ от $t = -t_n/2$ до $t = +t_n/2$ (фиг. 1а), спектралната функция е:

$$g(f) \approx \int_{-\infty}^{+\infty} U \cos 2\pi f t dt, \quad (3)$$

След интегриране се получава амплитудно-честотния спектър:

$$g(f) = \frac{U}{\pi f} \sin \pi f t_n, \quad (4)$$

На фиг. 1б е показана зависимостта на амплитудата на g от честотата (спектралната характеристика), като това е функцията $\frac{\sin x}{x}$.

Традиционната форма за представяне на сигнали е времевата (TD) и показва какво се случва с параметъра, който сигналът представлява изменение във времето. Информативността обаче силно намалява, когато сигналът стане по-сложен - комбинация от хармонични или е нехармоничен. В такъв случай много по-информативна се оказва честотната му форма (FD), т.е. спектърът на сигнала.

В този контекст, спектър на сигнала е съвкупността от отделните хармонични сигнали във FD форма (спектрални съставлящи, спектрални компоненти), които, комбинирани подходящо по амплитуда и фаза, “възпроизвеждат” времевата (TD) форма на сигнала.

Например, ако сигналът е периодичен с период T , отделните хармонични съставлящи са екви-дистантни на разстояние $1/T$ една от друга. Оттук може да се заключи, че ако сигналът е неперидичен (т. е. $T \rightarrow \infty$), разстоянието между съставлящите става безкрайно малко, т.е. $1/T \rightarrow 0$).

От енергетична гледна точка спектърът показва колко енергия се съдържа във всяка честотна компонента на сигнала, което може да се определи както теоретично, така и с помощта на измерване на FD формата. Например, чрез подходящо филтриране вълновата форма на сигнала може да се “декомпозира” на отделни чисто хармонични вълни (спектрални съставлящи), всяка от която експериментално да се изследва – спектрален анализ [2].

II. СПОСОБИ И МЕТОДИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНАТА ОБС-ТАНОВКА

Възможни са три метода за организация на анализа **Error! Reference source not found.**:

❖ Едновременният анализ (паралелният) е характерен с подаването на изследвания сигнал паралелно на n теснолентови филтри, настроени на n -тите хармонични. В изхода на всеки филтър се получава напрежение, пропорционално на амплитудата на съответния хармоник.

Изходните сигнали от филтрите могат да бъдат подадени към електронни волтметри по един за всеки филтър, но това не е икономично техническо решение. По-често се прави бързо последователно включване на изхода на всеки филтър към входа на един осцилоскоп.

❖ Последователният анализ се извършва с помощта на теснолентов филтър, който има възможност да се пренастройва в необходимия честотен обхват. Той не притежава бързодействието на паралелния метод, тъй като изследването се извършва за всеки хармоник последователно във времето, като се пренастройва резонансната честота на пропускащия филтър. Последователният анализ е приложим при изследване на процеси, които се изменят бавно в сравнение с продължителността на анализа.

❖ Комбинираният анализ се използва за създаване на устройства, в които паралелният анализ се прилага за подобхватите, на които е разбит целият честотен обхват, а във всеки подобхват се прилага последователният анализ.

Анализаторите на спектри могат да се класифицират:

А) Според метода на анализ: с последователен; с паралелен; с комбиниран анализ.

Б) По типа на индикатора: осцилографични или със самопишещи уреди.

В) Според честотния обхват: нискочестотни; високочестотни; свръхвисокочестотни.

Широко разпространение са намерили анализаторите на спектри с последователен анализ, при които процесът „НАСТРОЙКА” е автоматизиран, а на екрана се наблюдава изображението на спектъра, така че могат да се отчитат честотите и амплитудите на хармониците.

На *фиг. 2* е дадена структурната схема на осцилографичен анализатор на спектър с автоматична пренастройка.



Фиг. 2. Схема на анализатор с автоматична пренастройка

С усъвършенстване на цифровата техника и създадените високоскоростни аналого-цифрови преобразуватели все по-често в практиката намират приложение цифрови анализатори на спектри, които използват директно Фурие преобразование (DFT) - класически “спектрален” метод. В

много практически случаи сигналът $A(t)$ (описван с *формула 1*) е дискретизиран във времето с N равномерни отчета през интервал Δ до критична f_c (Найкуист) честота. Проблем при този директен метод е големият брой пресмятания за преминаване от TD в FD форма и паразитни ефекти от трансфер на честотни съставки $f > f_c$ вътре в интервала $0 < f < f_c$ (поява на фалшив спектър - aliasing). Утежняване на проблема оказват излишните отчетите извън лентата $f > f_c$, които променят истинския спектър $f < f_c$ във фалшив. Това може да се избегне чрез филтриране с ниско-честотен филтър преди дискретизация на отчетите.

Понеже директното Фурие преобразуване изисква много пресмятания (N^2 математически операции, където N е броят отчети, напр. $N \sim 10^6$), преобразуването $TD \Leftrightarrow FD$ в реално време се оказва трудно дори за модерните компютри. Ето защо, в съвременната комуникационна техника и други области, където се работи със сигнали и спектри, е разпространено бързото Фурие преобразуване (FFT), като се правят времеви отчети само в обхвата $f < f_c$. Така вместо за всички честоти, линейно независими отчети се правят само за N на брой дискретни честоти $f_n = n/N\Delta$ (където $N = -N/2, \dots, +N/2$), с което се намаля значително броя на отчетите 0.

III. ОСНОВНИ И ДОПЪЛНИТЕЛНИ ПАРАМЕТРИ НА СПЕКТРАЛНИТЕ АНАЛИЗАТОРИ

За правилен подбор на анализатор на спектъра за конкретен тип измерване, следва да се отчитат и следните основни характеристики [4]:

- Определяне на честота и честотни разлики - способност да се определи абсолютната стойност на честота и относителните честотни разлики между спектралните съставлящи.
- Разделителна способност (Resolution) - способност на прибора да разделя две близки синусоиди в състава на TD сигнала в неговия FD отклик; тя зависи основно от качеството на филтрите в IF канала.
- Период на развивката (Sweep time) и честотен прозорец (Span) - определят колко бързо може да се измерва спектърът (sweep time) и е в пряка връзка с разделителната способност и честотния прозорец (Span).
- Изглаждане на спектъра (Display smoothing) – способност за отделяне на спектъра от шума (използва се видео-филтър).
- Измерване на амплитуда и точност при измерването ѝ - способност за точно определяне на абсолютната амплитуда на отделните спектрални съставлящи.
- Динамичен обхват (Dynamic range) - това е способността на спектроанализатора да възпроизвежда едновременно два сигнала с различни нива с еднаква точност (относително и абсолютно).

1. Определяне на честотата в спектроанализаторите

Абсолютна и относителна честота в спектроанализаторите. При спектроанализаторите, както и при анализаторите на вериги честотата се определя от честотната скала на LO, която се задава от управляващото напрежение на генератора на развивката. Най-простият метод за измерване на честота е дадена спектрална съставляща е да се придвижи в центъра на екрана, при което тя се изравнява с честотата, отчетена по скалата на LO (или LO филтъра).

В съвременните спектроанализатори с цифрова обработка на IF сигнала измерването на честота става чрез цифров синтез на честотни маркери (с форма "+", "V", "O"), чието положение върху

честотната скала се определя от конкретната стойност на управляващото напрежение на генератора на развивката чрез компаратори на напрежение (при аналогови сигнал) или по цифров път. "Нулевата честота" се определя точно. Това е честотата на LO, която преминава през IF веригата и поставя началото $f = 0$.

2. Измерване на амплитудата на спектрални съставлящи

Има два вида измерване на нивото: на абсолютната и на относителната мощност на всяка спектрална съставляща в линейна или логаритмична скала. Определянето на тези параметри зависи от точността на входния RF атенюатор и от стабилността на усилването в IF усилвателя. Двата параметъра са свързани автоматично: ако затихването във входния атенюатор намалява (за да се увеличи чувствителността), IF усилването расте и обратно, ако затихването във входния атенюатор се увеличава (за да се предпази входният смесител от силен сигнал), IF усилването трябва да намалее. Така на екрана нивото на максимума на дадена спектрална съставляща не се променя, а се мени нивото на "пиедестала" (където е шумовия таван). Разработени са образци, при които се изменя референтното ниво (т.е. основата се запазва), а се увеличава височината на сигнала по оста у. В много от съвременните спектроанализатори има вграден калибриращ генератор на амплитудата.

3. Разделителна способност

Разделителната способност на спектроанализатора се определя от ширината на IF филтъра (аналогов или цифров) RBW. Типичните стойности на RBW при аналогови филтри е от порядъка на няколко kHz (min. 100-500 Hz), а при цифрови – много по-малка 100 Hz (дори по-малка от 10 Hz). Селективността на филтрите е различна: $\sim 25 : 1$ (min $11 : 1$) при аналогови; $\sim 5 : 1$ – при цифрови. Разделителната способност на спектроанализаторите е една от най-важните му характеристики, от която зависят и други параметри и свойства. Разделителната способност зависи от стабилността на честотата. Влияние оказват и:

- Остатъчна FM модулация на LO (Residual FM) - това е вътрешна честотна нестабилност на LO (типично 1kHz за YIG осцилатори). За подобряване на стабилността се използват фазово стабилизиращи честотни синтезатори (PLL LO).

- Шум от странични ленти (Noise Sidebands) - характерно за всеки осцилатор – честотна или фазова нестабилност, която се проявява като фазов шум. Измерва се в dBc и за спектроанализаторите е необходимо този параметър да е $< 80 \text{ dBc/1 Hz RBW /10 kHz offset}$ (за да се измери успешно фазовия шум). Ако това не е изпълнено, често се наблюдава нечувствителност на дадения прибор по отношение на много слаби сигнали близо до носещата честота.

- Период на развивката (Sweep time ST) - максимална разделителна способност се получава при минимална ширина на IF филтъра (например $\text{RBW} = 10 \text{ Hz}$), но тогава времето на период на развивката (ST) расте, а честотният прозорец за наблюдение Span – намалява. В противен случай се наблюдава изкривяване на резонансните криви на спектралните съставлящи. Това е така, защото IF филтърът е честотно-ограничено устройство и има крайно време за разреждане и зареждане на реактивните елементи. Примери: $\text{RBW} = 1 \text{ kHz} \Rightarrow \text{ST} \sim 1 \text{ s}$ $\text{RBW} = 300 \text{ Hz} \Rightarrow \text{ST} \sim 10 \text{ s}$ $\text{RBW} = 100 \text{ Hz} \Rightarrow \text{ST} \sim 100 \text{ s}$ Съвременните спектроанализатори имат автоматична функция за определяне на оптимално време ST за вече избрана ширина RBW.

4. Детектор на обвивката

Спектроанализаторът конвертира IF сигнала във видеосигнал чрез детектор на обвивката, който след това се превръща в цифров с цел да се наблюдава на дисплей. Схематично този детектор съдържа диод, резистивен товар и нискочестотен филтър за ограничаване на IF съставките. Амплитудно-модулираният IF сигнал след смесването се подава на този детектор, който "отделя" само обвивката (видео-сигнал) и потиска пулсациите - т.е. изглажда го. Ако IF сигналът съдържа само една синусоидална съставка (при тясна RBW), детекторът ще даде постоянно (dc) напрежение без вариации (идеален случай). Ако, обаче, RBW е голяма и включва повече съставки (синусоиди), между тях се появява "биене" и детекторът на обвивката регистрира вариациите на това "биене". Следователно, RBW трябва да се намали, за да може детекторът да "следва" обвивките на всяка синусоида поотделно. Така, детекторът на обвивката превръща спектроанализаторът във "волтметър" и ако сигнал съдържа 2 близки синусоиди, "волтметърът" ще покаже двете напрежения с отчитане на фазата между тях, докато един ватметър ще регистрира просто 3 dB по - силен сигнал.

Радио-честотните детектори и спектралните анализатори включват устройства, които могат да откриват, идентифицират и анализират радио-честотни сигнали предавани от различни източници. Радиочестотното оборудване за откриване на посоката на сигнала включва също устройства, които определят и регистрират направлението, от което радио-честотния сигнал е излъчен. Тези устройства могат също да се използват за откриване на предаватели на активни смущения. В табл. 1 са показани модели спектрални анализатори, предлагани от различни фирми [5],[7],[8],[9],[10].

Табл. 1: Модели спектрални анализатори, предлагани от различни производители

№ по ред	Фирма производител	Наименование на продукта	Цена	Честотен диапазон	Макс РЧ ниво на входа	Широчина на честотната лента в реално време	Импеданс
1.	Copper Mountain Technologies	Planar 808/1	53 338 лв.	100kHz-8.0GHz	+10 dBm	До 8 GHz	50 ома
2.	GW INSTEK	GSP – 9330 TG	12 712 лв.	9kHz – 3.25 GHz	+50 dBm	До 1 MHz	50 ома
3.	Aaronia	Spectran HF-80200 V5	39 465 лв.	9 kHz – 20 GHz	+20 dBm	До 88 MHz	50 ома
4.	GW INSTEK	GRF 1300	709 лв.	870 MHz – 920 MHz	+20 dBm	До 1MHz	50 ома
5.	Tektronix	RSA607A	21 757 лв.	9kHz – 7,5 GHz	+70 dBm	До 40 MHz	50 ома
6.	MediaMAX	S2C2T2 hd	4471 лв.	5 MHz- 2150 MHz	50 dBm	До 1 MHz	75 ома
7.	Aaronia	Spectran HF-6000 V4	3900 лв.	9 kHz – 8 GHz	+10 dBm	До 88 MHz	50 ома

От сравнението на всички фирми и техните продукти, представени в табл. 1, се вижда, че компанията Aaronia произвежда висококачествени преносими спектроанализатори от серия 6000 V4

с високи технически параметри и приемлива цена. Такива са спектроанализаторите SPECTRAN HF-6060 V4, SPECTRAN HF-6080 V4 и SPECTRAN HF-60100 V4 [6]. В табл. 2 са показани някои от техните.

Табл. 2: Параметри на спектрални анализатори от семейството SPECTRAN на компанията Aaronia

Параметър	HF-6060 V4	HF-6080 V4	HF-60100 V4
Честотен диапазон	10MHz – 6 GHz	10MHz – 8 GHz	1MHz – 9,4 GHz
Показано средно ниво на шума	-135dBm (1Hz)	-145dBm (1Hz)	-155dBm (1Hz)
Показано средно ниво на шума с предусилвател	-150dBm (1Hz)	-160dBm (1Hz)	-170dBm (1Hz)
Макс РЧ ниво на входа	+10dBm	+10dBm	+20dBm (opt.+ 40dBm)
Sample-Time	10mS	10mS	5mS
Ширина на честотната лента на филтъра	3kHz - 50 MHz	1kHz - 50MHz	200Hz -50MHz
Измервани единици	dBm, dBμV, V/m, A/m, W/m ² (dBμV/m, W/cm ²	dBm, dBμV, V/m, A/m, W/m (dBμV/m, W/cm ²	dBm, dBμV, V/m, A/m, W/m ² (dBμV/m, W/cm ² etc..
Филтри за електромагнитна съвместимост	-	-	200Hz, 9kHz, 120kHz, 200 kHz, 1,5MHz, 5MHz
Детектори	RMS, Min/Max	RMS, Min/Max	RMS, Min/Max
Демодулация	AM, FM	AM, FM, PM	AM, FM, PM, GSM
Входно съпротивление	50 ома	50 ома	50 ома
Точност	+/- 2dB	+/- 2dB	+/- 1dB
Интерфейс	USB 2.0/1.1	USB 2.0/1.1	USB 2.0/1.1
Тегло	430 g	430 g	430 g
Цена	2395лв	2542 лв	2933 лв

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От сравнителния анализ на серия SPECTRAN показан в табл. 2 се вижда, че преносимия спектроанализатор SPECTRAN HF-60100 V4 притежава най - голям честотен диапазон, и подходящо усилване при комплектуване с предусилвател, при пренебрежимо малко оскъпяване и би бил от изключителна полза за работата и обучението, както на курсанти така и на студенти. С него могат да се откриват източници на смущения и извършват широк кръг от РЧ измервания с висока чувствителност, непосредствено отчитане на интензивността на източниците на смущения, съхраняване и обмен на получените резултати с компютър за последваща обработка и анализ.

References

- [1] Беджев, Б., (2008), “Анализ и синтез на системи от сигнали”, Шуменски Университет „Епископ Константин Преславски”, Факултет по Технически науки, стр.107-109
- [2] Данков, П., (2018), Лекция 4 “Измерване на спектри на сигнали. Спектроанализатори”, достъпна на <https://www.phys.uni-sofia.bg/~dankov/>
- [3] Пешев, Т., Илиев, И., Киров, М., (2017), “Измервания в комуникациите”, Министерство на отбраната, Национален военен университет “Васил Левски”, Факултет “Артилерия, ПВО и КИС”, стр.131-137
- [4] Arnitsu, (2017) Digitizer Applications Using High-Performance Signal Analyzer, Application Note
- [5] <https://aaronia.com/>
- [6] https://aaronia-shop.com/products/spectrum-analyzer/handheld-spectrum-analyzer?gclid=EAIaIQobChMIm_G63Mvs8gIVB7wYCh27iQukEAAyAAEgIh0PD_BwE&__cf_chl_jschl_tk__=pmd_zMvxjOCdESjmtuck_mev12F.Fknb9sDpp6waW.JE74Q-1631008397-0-ggqNtZGzNAqWjcnBszQiR
- [7] <https://bg.farnell.com/gw-instek/gsp-9330-tg/spectrum-analyzer-w-tg-9khz-3/dp/2748497>
- [8] <https://newtek.bg/shop/izmervatelna-tehnika/spektralni-analizatori/rsa607a/>
- [9] <https://rtelecom.net/en/product/386/field-meter-and-tv-analyzer-fte-mediamax-mini-s2c2t2-hd.html>
- [10] <https://www.rtelecom.net/bg/product/225/planar-808-1-vektoren-analizator-na-mrezhi-100khz-8-0ghz.html>

БЛАГОДАРНОСТИ

Тази статия е резултат от работата по проект „Анализ и приложения на методите за оценка на товареността на електромагнитния спектър”, финансиран от Национален Военен Университет – Велико Търново, Факултет “Артилерия, ПВО и КИС”.