



**ФУНКЦИОНАЛНА УСТОЙЧИВОСТ НА
РАДИОКОМУНИКАЦИОННИ СИСТЕМИ СЪС СПЕЦИАЛНО
ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ**

Антонио Андонов
andonov@vtu.bg

*ВТУ „Т. Каблешков”, София, ул. „Г. Милев” 158,
БЪЛГАРИЯ*

1. Проблемът за функционалната устойчивост в съвременната теория на автоматичното управление.

Проблемната ситуация, предшестваща възникването на даденото научно направление и целият комплекс изследвания в областта на функционално устойчивите технически системи, е свързана с разработването в края на ХХ век на сложни автономни технически системи, функциониращи в екстремални условия – преди всичко авиационно-космически и ракетно-космически системи. Тяхната висока стойност и потенциална опасност са изисквали осигуряването на съответното ниво на надеждност и безопасност на функционирането им. При това, традиционните методи, основани на многократно резервиране, въвеждане на системи за вграден контрол и на елементи с повишено ниво на надеждността, са влошавали технико-икономическите характеристики на проектираните системи, без да доведат до нужното намаляване на вероятността за възникване на опасни ситуации. Необходимостта от въвеждането на допълнителен апаратен излишък за осигуряването на надеждността на системата се е превърнало в принципно ограничение на дадения подход [1,2]. Било е предложено състоянията на системата, предизвикани от откази, да се разглеждат като допустими и за тях да се формира адекватно, т.е. функционално устойчиво управление, насочено към парирание на последствията от откази и поддържане изпълнението на функциите на системата. Чрез това управление се осигурява преразпределение на ресурсите на системата за достигане на основната цел, даже в условия на откази.

Съгласно [3], под функционална устойчивост на системата се разбира нейното свойство да запазва в продължение на зададен интервал от време изпълнението на своите основни функции в граници, установени от нормативните изисквания, в условия на противодействие, неизправности, откази и външни дестабилизиращи фактори. В публикации [3, 4] е анализирана връзката на понятието „функционална устойчивост” с понятията „надеждност”, „отказоустойчивост” и използваното в нашата и руската специализирана литература „живучест”. Съгласно тези публикации, принципното различие между тях се свежда до следното: методите за осигуряване на функционална устойчивост са насочени не към намаляване количеството на откази (както например традиционните методи за повишаване на надеждността, отказоустойчивостта, живучестта на техническите системи), а към осигуряването на изпълнението на най-

съществените функции, когато тези откази са настъпили. Ето защо, задачата за осигуряване на функционалната устойчивост днес се разглежда като една от най-актуалните научни задачи на съвременната теория на автоматичното управление [1].

В системите за автоматично управление смущаващите въздействия и управляващите сигнали по принцип са пространствено разделени. Това позволява както да се измерват, така и да се оценяват в определен смисъл (критерий) смущаващите въздействия, независимо от случайния им характер и да се използват различни компенсационни методи за реализация на инвариантността им относно тези смущения, отличаващи се от условията и методите за достигане на инвариантността [1, 4]. Тези методи основно се свеждат до следните три направления:

- принцип на двуканалността, при който по втори, изкуствено създаден канал, се компенсира смущаващото въздействие в първия канал. Тук се реализира възможност за получаване на нулева предавателна функция по отношение на смущаващото въздействие от точката на прилагането ѝ до управляемата координата;

- второто направление се базира на използването на дълбока отрицателна обратна връзка. При голям коефициент на усилване във веригата на обратната връзка, практически произволни отклонения се компенсират;

- третото направление е свързано с изучаване на възможностите за създаване в точката на управление на вериги с нулеви предавателни функции по отношение на смущението.

Необходимо е да се отбележи, че терминът „инвариантност”, като основна компонента и цел на функционално-устойчивото управление, изисква уточняване по отношение на това, коя числова характеристика на системата за управление е инвариантна и относно кои преобразувания или въздействия. В случая на радиокомуникационни системи, ролята на смущаващи въздействия са преди всичко смущенията в широк смисъл – както различните видове шум, наслабващи се върху приетия сигнал, така и случайните изменения на характеристиките и параметрите на комуникационния канал и сигнала, оказващи влияние върху шумоустойчивостта. В този случай характеристиката на системата, която трябва да бъде инвариантна на смущенията, е нейната шумоустойчивост, изразявана количествено например с вероятността за грешка при цифрови комуникации.

Същевременно, трябва да се подчертае, че в комуникационните системи, за разлика от системите за автоматично управление, полезният сигнал и смущението въздействат в една и съща точка, най-често на входа на приемника и принципно не могат да бъдат напълно разделени. В противен случай може да се каже, че проблемът за борба със смущенията не би съществувал. В радиокомуникациите винаги се говори за смес сигнал-шум, като в частност винаги присъства белият шум като адитивна компонента. Адитивното смущение се наслабва с полезния сигнал и на входа на приемника постъпва изкривен сигнал. Параметрите на адитивното смущение непосредствено определят шумоустойчивостта на комуникационната система и ако то е нестационарен случаен процес, то достоверността на предаването на информация се изменя. Така например, ако мощността на смущението нараства с времето, то ще нараства и вероятността за грешка при елементарно приемане. Неадитивните смущения водят до съответно изменение на отделни параметри на сигнала и канала. Тъй като по принцип изменението на параметрите на канала е възможно да се изразят чрез съответното изменение на параметрите на сигнала, неадитивните смущения влияят върху шумоустойчивостта, като условията на приемане могат да се влошават или подобряват, а това изменя вероятността за грешка. Например, под влияние на неадитивните смущения може да се промени предавателната функция на канала или честотата на сигнала. Ето защо построяването на функционално устойчиви

радиокомуникационни системи с инвариантни спрямо комплексно въздействие на смущения параметри и характеристики, изисква в редица отношения друга постановка и подход в сравнение с проблема за функционалната устойчивост на системите за автоматично управление.

2. Постановка на проблема за функционална устойчивост на радиокомуникационни системи със специално предназначение.

Съвременните достижения в областта на теоретичните основи на комуникациите, теорията на сложните системи, информацията, широкото интегриране на техническите средства за комуникация с компютърните системи, в съчетание с новите достижения в областта на събирането, обработката и предаването на информация, позволяват да се говори за появата в областта на информационните технологии на такова понятие като „информационна борба, респ. война”. Принципната новост, комплексност и многостранност на проявлението, изобилието на различни форми и методи за водене на информационна война, превръщат самото понятие твърде сложно и дискусивно за една пълна коректна дефиниция [1]. От началото на 1990г. са станали известни два основополагащи документа: Директива на МО на САЩ № TS – 3600.1 „Информационна война” от 21.12.1992г. и Меморандум на комитета на началник щабовете на ВС на САЩ № 30 „ Борба със системите за управление” от 08.03.1992г. Тук фактически е формирано понятието „електронна война” (Electronic Warfare) в широк смисъл на думата. В тези източници електронната война се възприема като „комплекс от мерки с използване на средства за електромагнитно излъчване, насочени към снижаване на ефективността или възпрепятстване на използването от противника на електромагнитния спектър, а също така осигуряване на ефективното използване на електромагнитния спектър от своите войски.

Радиоелектронната война (EW) включва в себе си три базови компоненти [5,6]:

- радиоелектронна поддръжка (Electronic Support Measures – ESM);
- радиоелектронно противодействие (Electronic Counter Measures – ECM);
- радиоелектронна защита (Electronic Counter Measures – ECCM).

Информационната борба на враждуващите страни доведе до принципи на формиране на смущения с оглед подавяне на комуникационни системи. В общ случай радиоелектронното подавяне (РЕП) включва два последователни етапа: радиотехническо разузнаване и радио-противодействие. Целта на радиотехническото разузнаване е установяване-то на работата (излъчването) на радиоелектронната система и определяне на нейните параметри, необходими за организация на радиопротиводействието. На тази база радиопротиводействието създава такива условия, които биха затруднили работата на системата или въобще биха я довели до излизане от строя.

Под шумозащитеност на радиокомуникационните системи се разбира тяхната способност да изпълняват своите задачи в условията на радиоелектронно подавяне. Основен способ на радиопротиводействие е поставянето на смущения. Под смущения в широк смисъл се разбира всяко непоразяващо въздействие върху приемното устройство, затрудняващо приемането на полезния сигнал. Основно, изкуствено създадените за тази цел, т.н. преднамерени смущения, по характера на въздействие се подразделят на маскиращи и имитационни. Маскиращите смущения изкривяват структурата на приеманите сигнали и затрудняват или напълно изключват възможността за отделянето на информацията в радиоприемното устройство. Имитационните смущения се възприемат от апаратурата или оператора като свой, полезен сигнал. Такива смущения, които трябва да се очакват в действащите радиоканали, са например: лъжливи повиквания за връзка; ретрансляция на предварително записани сеанси за връзка; предаване на лъжливи радиोगрами и команди, имитация на командите за автопуск в автоматизирани радиолинии. Следователно, имитационните смущения са

високоэффективни смущения. Същевременно обаче, по отношение на тяхното създаване, имитационните смущения са най-сложният вид смущения, чието формиране се нуждае от възможно най-пълна информация за подавяната система, получена на етапа на радиоразузнаването.

Способността на системата да противостои на радиотехническото разузнаване, която е необходима за организиране на радиопротиво-действието, се нарича скритост, докато способността на системата да функционира със заданено качество в условия на РЕП, се нарича шумозащитеност. Тогава, естествено шумозащитеността количествено се характеризира с вероятността за успешно отделяне на полезната информация в условия на въздействие на смущенията от РЕП. Най-общо показателят за качество, характеризиращ шумозащитеността се определя от конкретната цел на функциониране на РКС. Така например, за системите за радиовръзка и радиоуправление, най-адекватен показател на шумозащитеността е средната вероятност за грешка при различаване на сигналите. В радиолокацията, радионавигацията, телеуправлението по адекватни показатели са вероятността за правилно откриване при зададена вероятност за лъжливи тревоги и средноквадратична грешка при оценка параметрите на сигнала.

Съвременните РКС функционират в условия на комплексно въздействие на естествени и преднамерени смущения. Проблемът за повишаване на шумоустойчивостта, ефективността и способността на системите за радиовръзка и управление да съхраняват във времето в установени граници способността си да изпълняват зададени функции в предварително неопределена, динамично изменяща се обстановка, при функциониране в условия на радиотехническо разузнаване и радиоелектронно подавяне, е от изключителна актуалност, ако не и най-значителният – за това свидетелства увеличаващият се поток публикации. Ще отбележим, че предизвикалите голям интерес достъпни публикации в тази насока, излезли през 2000г. от издателство „Artech House Inc.”, специализирано в областта радиокомуникациите и радиоелектронното противодействие, книги на D.C.Scheher “Advanced Electronic Warfare Principles”, 327стр. и E.Waltz “Introduction to Information Warfare”, 380 стр.

Процесът на функциониране на системата за радиовръзка в условията на радиоподавяне по своята физическа същност представлява радиоелектронен конфликт. В този конфликт от една страна участва системата за предаване на информация (РКС), а от друга страна – системата за РЕП, състояща се в общ случай от станция за радиотехническо разузнаване, осигуряваща търсене, откриване и измерване на параметрите на сигнала на подавяната РКС и непосредствено станция, генерираща смущения.

Същевременно, в реални условия, в работата на системата за предаване на информация, конфликтна ситуация възниква не само в случай на преднамерени смущения, но и винаги, когато информацията за възможните смущения в канала за връзка, е ограничена. За конфликтна ситуация може да се говори също при предаване на информация при изменяща се активност на канала, когато операторът на системата за предаване на информация се стреми да максимизира скоростта на предаване, а природата се стреми да я минимизира. В този случай можем да кажем, че „природата” като източник на смущения, има „пасивно” поведение. По този начин е възможно, като се използва условната трактовка за конфликтна ситуация, да се постави задачата за формиране на съгласувани с канала за връзка сигнали, при което да бъде гарантирано минимално ниво на нейната работоспособност в условия на въздействие на произволни смущения, когато „природата” се стреми да избере такова смущение, респ. да предоставя такъв канал, при който никакво действие от страна на РКС не би довело до повишаване на нейната работоспособност над определено гарантирано максимално ниво.

Тогава такава фундаментална характеристика на системата за служебна радиовръзка с подвижни обекти, каквато е шумоустойчивостта, не може да представлява изчерпателно нейното качество на функциониране. За тази цел е необходимо да се въведат показатели, които биха позволили да се оцени способността на системата да запазва стойностите на характеристиките на шумоустойчивостта в определени граници при изменение на параметрите на сигналите и смущенията. Способността на системите за мобилни комуникации да запазват стойностите на характеристиките на шумоустойчивост в зададени граници при изменение на статистическите характеристики на случайните параметри, а също и при вариации на формата и параметрите на сигнала и смущенията, се определя като **функционална устойчивост**. В този смисъл функционалната устойчивост може да се определи като вариационно-параметрична (устойчивост по отношение на вариациите на параметрите на сигнала и смущенията) и вариационно-функционална (т.е. по отношение на вариации на формата на сигнала и смущенията). Развитието обаче на методи на статистическата теория на връзките, при които да се съчетава максимизиране на функционалната устойчивост в изменяща се шумова обстановка и минимизиране на пълната вероятност за грешка, която определя качеството на приемане, практически са слабо засегнати в литературата.

Усъвършенстването на средствата и комплексите за радиовръзка по отношение на подобряването на шумоустойчивостта до голяма степен се свързва с използването на т.н. сложни, респ. шумоподобни сигнали. На изследването на свойствата на такива сигнали, особеностите на тяхното формиране, демодулация и принципи на апаратната им реализация са посветени голям брой работи. В завършен вид са редица решения на задачата за статистически синтез на модеми, предназначени за работа в канали с комплексно въздействие на смущения и притежаващи сравнително висока шумоустойчивост. Обаче, трябва да се подчертае, че известните методи за синтез и оптимизация на демодулаторите на шумоподобни сигнали /ШПС/ са ориентирани към осигуряване на минимума на пълната вероятност за грешка, с която е прието да се характеризира качеството (достоверността) на приеманите дискретни съобщения. По отношение на функционалната устойчивост, обаче не по-малка по значимост е тяхната способност да осигурят този минимум при динамично изменяща се шумова обстановка. Бурното развитие на микроелектрониката, комуникационните и информационни технологии стимулира и позволява в това направление да се търсят и разработват нови методи за предаване и обработка на информацията и защита на РКС със ШПС от въздействието на различни по вид смущения.

На настоящето ниво на развитие на мобилните радиокомуникационни системи, функциониращи в условия на комплексно въздействие на смущения, разработването на методи за повишаване на шумоустойчивостта им се развива в няколко основни направления.

Първото направление обединява различни методи за защита на приемниците от въздействието на различни негаусови смущения по пътя на въвеждането в алгоритмите за обработка на сигналите на безинерционни и адаптивни преобразуватели, обезпечавщи гаусовост на статистиката, анализирана от демодулатора. В приемния тракт широко се използват ограничители за свиване на динамичния диапазон на анализирания от демодулатора смес сигнал и шум. В съвкупност с лентов филтър за честотна селекция на сигнала, включен към неговия изход, ограничителят обезпечава нормализация на случайния процес.

Второто направление за повишаване на шумоустойчивостта е свързано с използването на сигнали със сложна структура, канали с решаваща обратна връзка и със синтез на алгоритми, минимизиращи влиянието на смущенията върху

шумоустойчивостта. В това направление особено актуално е изследването на алгоритми за предаване на информация с използване на шумоподобни сигнали с оптимизирана структура, позволяващи да се гарантират нивата на работоспособност на системата в различни ситуации, като се отчитат статистическите характеристики на сигнала, канала и шумовата обстановка. Този път е свързан с двумерното (честотно-времево) кодиране на всеки елемент на сигнала: чрез формиране на псевдослучайно превключване на работните честоти или чрез използване на псевдослучайни последователности, манипулиращи фазата на сигнала. Използването на указаните два вида сложни сигнали позволява значително да се повиши шумоустойчивостта на радиосистемите с цената на въвеждането на многократен честотно-времеви излишък в сигнала и съответното усложняване на неговата обработка в приемника. Този път е универсален, тъй като построяването на радиолинии с такива сигнали обезпечава висока достоверност на предаването на информация в условия на въздействие на смущения от произволен вид и се оказва практически единствена мярка за обезпечаване на устойчива връзка при въздействие на мощни преднамерени смущения върху системата.

В условията на работа на редица служебни радиокомуникационни системи за предаване на информация с осигурителна отговорност (например в сферата на железопътния транспорт) определящо е влиянието на импулсните смущения при приемането на сигналите. Това влияние се проявява както в непосредствено изменение на дисперсията на смущенията, така и в откази на адаптивните устройства за пространствено-честотно-времева обработка на сигналите, синтезирани при предположението за квазистационарност и гаусовост (в обобщен смисъл) на приеманата смес, в резултат на което ефективността на радиосистемата съществено се влошава при тяхното въздействие. Трябва да се има предвид, че показателите на шумоустойчивостта – средноквадратичната грешка на възпроизвеждане на сигнала и вероятността за грешно решение на демодулатора за предаваното дискретно съобщение, не са напълно адекватни на реалните условия на връзката. В нестационарните канали на системите за подвижна радиовръзка отношението сигнал/шум се изменя в процеса на функциониране на системата, следователно се изменя и определената по указания начин достоверност. Ако за интервала на предаване на съобщението тези изменения могат да се пренебрегнат, то каналът се счита локално стационарен и в допълнение на средноквадратичната грешка или вероятността за грешка за оценка на шумоустойчивостта е необходимо да се определи доверителната вероятност за това, че стойностите на тези величини няма да превишат допустимите. При въздействие на импулсните смущения постоянството на отношението сигнал/шум се нарушава от мощни кратковременни отскоци на електромагнитното поле на смущенията, които рязко изменят отношението сигнал/шум и оценката на шумоустойчивостта придобива специфични черти.

В каналите за радиовръзка с подвижни обекти вероятността за грешка е променлива величина (нееднороден канал с променливи характеристики). В този случай, дори да се удаде обезпечаването на средна стойност на вероятността за грешка по-ниска от зададената допустима, в отделни интервали от време вероятността за грешка може да се установи по-голяма от допустимата стойност. Освен това в нестационарни канали намаляването на средната вероятност за грешка не показва еднозначно повишаване на качеството на функциониране на системата. Така например, ако съвместно с намаляването на средната вероятност за грешка, се увеличи процента на случаите, когато вероятността за грешка става по-голяма от допустимата, то шумоустойчивостта на системата намалява. От тук следва в частност, че оптимизацията на радиосистемата в съответствие с широко използвания критерий за минимум на средната вероятност за грешка, не обезпечава най-добро качество на функциониране на

реалните системи в канал с променливи параметри. За обезпечаването на приемливо качество на функциониране на реална система за радиовръзка в канал с променливи характеристики е необходимо да се поддържа вероятност за грешка на ниво, непревишаващо предварително зададена допустима стойност. По същество това означава, че зададеното качество на функциониране на системата се постига благодарение на независимостта (частична или пълна) на вероятността за грешка от причините, предизвикващи нестационарността на канала за връзка. Това качество, известно като **инвариантност** в теорията на автоматичното управление, представлява свойството на системата да се противопоставя на смущаващи въздействия [3]. В най-общ случай, ако изходната координата на системата $y(t)$ за произволен момент от времето t не зависи от смущението $f(t)$, системата е с абсолютна инвариантност спрямо $f(t)$:

$$y(t) = \text{in var } f(t)$$

Ако това свойство се изпълнява приблизително (в някакъв определен смисъл), то инвариантността е с точност до ε (ε - инвариантност) и системата е относително инвариантна, т.е.:

$$y(t) = \text{in var } f(\varepsilon)$$

Проблемът за инвариантността в системите за връзка трябва да се разглежда с отчитане особеностите на реализация на сигнала и смущението. Докато в системите за автоматично управление смущаващите въздействия и управляващите сигнали са пространствено разделени, което позволява прилагането на компенсационни методи и принципът на двуканалността за изграждане на компенсационни структури, то в системите за връзка полезният сигнал и смущението действат в една и съща точка (на входа на приемника) и принципно не могат да бъдат напълно разделени. В радиокомуникационните системи смущението въздейства в същия канал, по който се предава и сигналът, т.е. налице е сместа сигнал-шум (в частност адитивна). Това налага да се търсят други методи за постигане на инвариантност, които не са характерни в общ случай за системите за автоматично регулиране.

Понятията инвариантност и функционална устойчивост са взаимно свързани. Ако се разглежда инвариантността на характеристиките на шумоустойчивостта, зададени във вид на функционална зависимост на вероятността за грешка от параметрите на сигнала и смущенията, при което ако системата има характеристика на шумоустойчивостта, абсолютно инвариантна към определен клас смущения, то изследването на нейната функционална устойчивост губи смисъл. Но ако се абстрахираме от възможностите за обезпечаване на функционална устойчивост на радиосистемите чрез използване на шумоустойчиво кодиране, то следва да се приеме, че при наличие на смущения в канала, същите ще бъдат преобладаващо с относително инвариантни характеристики на шумоустойчивостта.

Ако системата има ε - инвариантна характеристика, то относителната инвариантност и функционалната устойчивост са понятия до голяма степен еквивалентни. Функционалната устойчивост е по-широко понятие, което се свързва с изследването на възможностите, които се откриват с развитието на съвременната елементна база за реализация на принципите за осъществяване на функционалната устойчивост на радиокомуникационните системи в изменящата се сигнално-шумова обстановка. Именно усъвършенстването на елементната база премахва препятствията, произтичащи от усложняването на апаратурата и е основният фактор, определящ темпа на развитие и постиженията на техническия прогрес. От тази гледна точка в предложената работа е поставен проблемът за функционалната устойчивост на радиокомуникационни системи със специално предназначение.

Литература:

[1.] Андонов А., Радиокommunikационни системи със специално предназначение. ВТУ, 2009 г., ISBN 978 954-12-0167-1, стр. 300.

[2.] Андонов А. Проблемът за функционалната устойчивост на системите за подвижна радиовръзка, С., ВТУ, 1996

[3.] Машков О.А. Принципы построения функционально устойчивых бортовых информационно-управляющих комплексов. Сб. „Проблемы управления и навигация авиационно-космических систем, К., 1991.

[4.] Горский Ю.М. Системно-информационный анализ процессов управления, М., Наука, 1998.

[5.] Складар, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, под общей редакцией А.В.Назаренко, 2003.

[6. D.C.Scheher “Advanced Electronic Warfare Principles”, С. Premier Press, 2007, 327стр.

[7.] E.Waltz “Introduction to Information Warfare”, С. Premier Press, 2009, 380 стр.